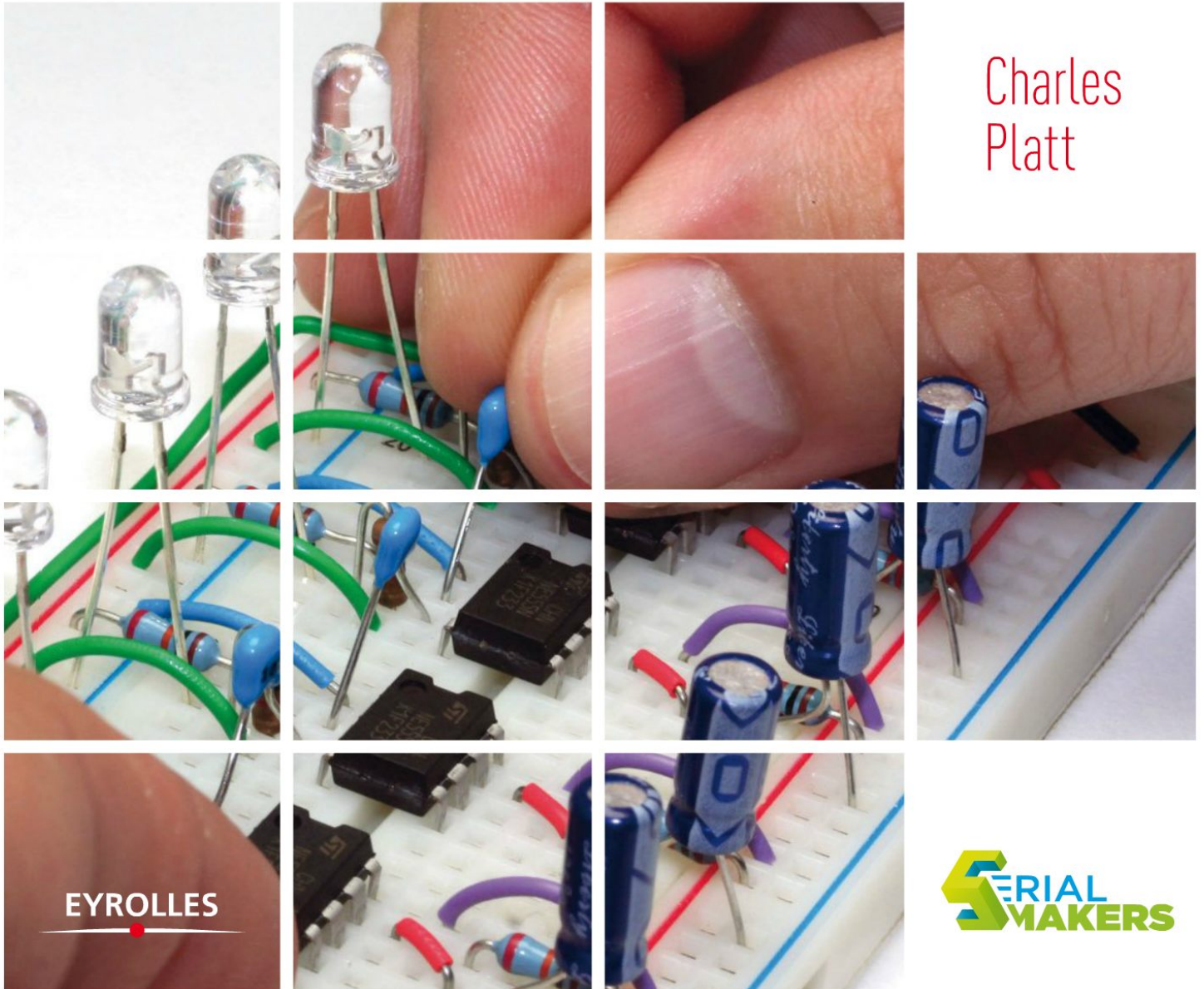


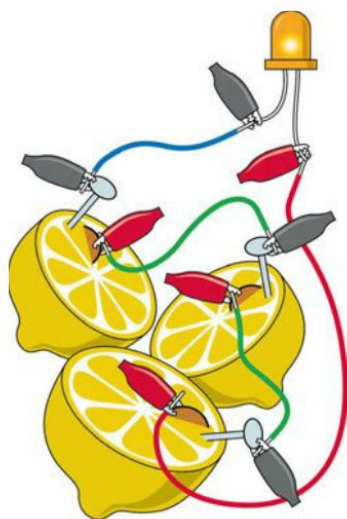
L'ÉLECTRONIQUE EN PRATIQUE

34 expériences ludiques

2^e édition

Charles
Platt





Un peu de théorie, beaucoup de pratique !

Vous souhaitez vous mettre à l'électronique, mais à condition de pratiquer tout de suite ? Vous voulez en connaître les grands fondements, mais sans risquer l'overdose de théorie ? Avec ce livre d'introduction, vous commencerez à monter des circuits simples dès la première page.

Par le biais de 34 expériences, toutes plus amusantes les unes que les autres, vous découvrirez les principaux composants et les concepts essentiels de l'électronique. Vous

serez guidé pas à pas dans la réalisation de montages de plus en plus complexes, allant d'un commutateur basique aux circuits intégrés, d'une LED qui clignote aux microcontrôleurs programmables. Ludique, inventif, foisonnant d'illustrations (plus de 500 photos, schémas et dessins), écrit dans un langage vivant et accessible, cet ouvrage remarquable met l'électronique à la portée de tous. Entièrement refondue et révisée, cette deuxième édition comporte beaucoup de nouveaux projets, en privilégiant les composants bon marché et les cartes Arduino.

À qui s'adresse ce livre ?

- Aux électroniciens en herbe, amateurs, bricoleurs, bidouilleurs, geeks, étudiants, musiciens...
- À tous les makers qui souhaitent découvrir l'électronique par la pratique.

Dans ce livre, vous apprendrez notamment à :

- vous aménager un bel espace de travail, équipé de tous les outils nécessaires
 - identifier les principaux composants électroniques et leurs fonctions dans un circuit
 - fabriquer une alarme anti-intrusion, une radio, un bijou électronique, un testeur de réflexes et un verrou à combinaison
-

Charles Platt est un passionné d'électronique depuis son enfance. Auteur de plusieurs ouvrages de science-fiction, il a enseigné le graphisme, puis est devenu l'un des principaux rédacteurs du magazine *Wired*. Aujourd'hui, il contribue régulièrement à la revue américaine *Make*, bien connue des makers.

Make:
makezine.com

L'électronique en pratique

L'électronique en pratique

2^e édition

Charles Platt

Avec les photos et illustrations de l'auteur

EYROLLES



ÉDITIONS EYROLLES
61, bld Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Authorized French translation of the English edition of *Make: Electronics*, 2nd Edition, ISBN 978-1-680-45026-2 © 2015 Helpful Corporation, published by Maker Media Inc. This translation is published and sold by permission of O'Reilly Media, Inc., which owns or controls all rights to sell the same.

Traduction autorisée de l'ouvrage en langue anglaise intitulé *Make: Electronics*, 2nd Edition de Charles Platt (ISBN : 978-1-680-45026-2), publié par Maker Media, Inc.

Adapté de l'anglais par Jean Boyer

Composition : Soft Office (38)

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Charles Platt pour les photos et illustrations de la présente édition

© Groupe Eyrolles, 2016, pour la présente édition, ISBN : 978-2-212-14425-3

*Aux lecteurs de la première édition de L'électronique en pratique qui ont contribué,
par leurs nombreuses idées et suggestions, à ce deuxième opus.
Et en particulier à Jeremy Frank, Russ Sprouse, Darral Teeple, Andrew Shaw, Brian Good,
Braham Patel, Brian Smith, Gary White, Tom Malone, Joe Everhart, Don Girvin, Marshall Magee,
Albert Qin, Vida John, Mark Jones, Chris Silva et Warren Smith.
Certains d'entre eux m'ont également aidé à corriger quelques erreurs dans le texte de l'ouvrage.
Les retours de mes lecteurs sont inestimables.*

Avant-propos

Tout le monde utilise des appareils électroniques, mais sans trop savoir comment ils fonctionnent.

Peu importe, me direz-vous. Si vous savez conduire une voiture sans connaître le principe d'un moteur à combustion, vous pouvez certainement utiliser un iPod en ignorant tout des circuits intégrés.

Alors pourquoi devriez-vous apprendre l'électricité et l'électronique ? J'y vois trois raisons principales :

- Si les technologies vous sont familières, vous contrôlerez davantage votre environnement au lieu de le subir. Si votre appareil électronique ne fonctionne plus, vous serez plus à même de le réparer au lieu d'éprouver un sentiment d'incompétence.
- L'apprentissage de l'électronique peut être amusant s'il est bien mené. Les outils sont relativement bon marché, un dessus de table suffit pour travailler et vous pouvez n'y consacrer qu'un temps limité.
- La maîtrise de l'électronique peut accroître votre valeur dans votre cadre professionnel, voire vous conduire à une carrière totalement nouvelle !

Apprendre par la pratique

La plupart des ouvrages d'initiation commencent par des définitions et des faits, puis vous amènent progressivement à l'étape de montage d'un circuit simple.

À l'école, l'étude des sciences suit le plus souvent un plan similaire. C'est ce que j'appellerais *l'apprentissage par l'explication*.

Ce livre procède de manière inverse. Dès les premières pages, vous serez plongé dans le sujet et amené à assembler des composants afin d'observer ce qui se passe. Je

suis persuadé que cette méthode d'*apprentissage par la pratique* est plus amusante, plus intéressante et plus marquante.

On retrouve cet apprentissage par la pratique dans le monde de la recherche, lorsque les scientifiques observent un phénomène qu'aucune théorie ne peut expliquer : ils commencent alors par l'étudier pour essayer de le comprendre. Nous allons procéder à l'identique, à notre niveau bien sûr.

En cours de route, vous commettrez certainement quelques erreurs. Ne vous en souciez pas : ces erreurs sont bénéfiques, elles constituent la meilleure façon d'apprendre. Dans le livre, je vous demanderai même de brûler et de démonter des composants, car c'est une excellente façon d'en connaître les limites. Comme nous n'utiliserons que des tensions faibles, vous ne courrez aucun risque d'électrocution et, si vous limitez le flux du courant en respectant les procédures décrites, il n'y aura aucun danger que vous vous brûliez les doigts ou déclenchiez un incendie !



Ne dépassez pas les limites !

Même si je pense que toutes les expériences décrites dans cet ouvrage sont sans risque, n'essayez pas de dépasser les limites indiquées. Suivez toujours les instructions et prêtez attention aux différents avertissements, signalés par l'icône ci-dessus. Si vous franchissez les limites imparties, vous vous exposerez à des risques inutiles.

L'apprentissage sera-t-il difficile ?

Je pars du principe que vous n'avez aucune connaissance préalable en électronique. Par conséquent, les toutes premières expériences seront extrêmement simples : pour créer un circuit, vous n'aurez même pas besoin de soudure ni de cartes de prototypage, il vous suffira de maintenir les fils avec des pinces crocodile.

Je ne pense pas que l'électronique amateur soit difficile à comprendre. Bien sûr, si vous souhaitez l'étudier de façon formelle et inventer vos propres circuits, cela peut devenir plus ardu. Mais dans ce livre, les outils et les fournitures seront très abordables, les objectifs clairement définis, et les seules connaissances mathématiques nécessaires se résumeront aux opérations d'addition, de soustraction, de multiplication et de division.

Comment ce livre est-il structuré ?

En règle générale, il existe deux façons de présenter les informations dans ce genre d'ouvrage : sous forme de travaux pratiques, ou bien dans des textes de référence plus formels. Dans ce livre, j'utiliserai les deux méthodes.

Vous trouverez des travaux pratiques dans les sections commençant par :

- « Expérience »
- « De quoi avez-vous besoin ? »
- « Attention »

Les expériences sont au cœur de ce livre. Elles ont été classées afin que les connaissances acquises au fur et à mesure soient utilisées dans les projets suivants. Je vous suggère de réaliser les expériences en suivant leur ordre de présentation, si possible en n'en sautant aucune.

Vous trouverez des textes de référence dans les sections commençant par :

- « Fondamentaux »
- « Théorie »
- « Historique »

Ces sections sont importantes. Toutefois, libre à vous de naviguer entre ces textes comme vous le souhaitez. Ainsi, vous pouvez très bien en sauter certains pour y revenir plus tard.

Si quelque chose ne fonctionne pas

Il n'y a en général qu'une seule façon de réaliser un circuit fonctionnel, alors qu'il en existe des centaines qui conduiront à des erreurs. La chance est souvent contre vous, à moins que vous ne procédiez très attentivement et méthodiquement.

Je sais combien il est frustrant de constater que les composants assemblés ne réalisent pas ce que l'on attend d'eux, mais si votre circuit ne fonctionne pas, suivez la procédure de recherche d'erreurs de la section « Fondamentaux : recherche des erreurs » page 68.

Pour aller plus loin

Lorsque vous aurez réalisé toutes les expériences décrites dans ce livre, vous aurez acquis les grandes bases de l'électronique. Si vous souhaitez en savoir davantage, je vous conseille de lire ensuite *L'électronique en pratique 2*, également publié aux éditions Eyrolles. Cet ouvrage un peu plus complexe, qui utilise le même concept d'apprentissage par la pratique que le premier, permet d'acquérir un niveau « intermédiaire » en électronique.

Je ne suis pas qualifié pour écrire un ouvrage de niveau supérieur. En conséquence, je n'ai pas l'intention de publier un ouvrage qui pourrait s'intituler *L'électronique en pratique 3* !

Si vous souhaitez par la suite vous perfectionner en électronique, je vous recommande l'ouvrage en anglais de Paul Scherz *Practical electronics for inventors*. Rassurez-vous, il est inutile que vous soyez un inventeur pour le trouver intéressant.

Nouveautés de la seconde édition

L'ensemble du texte de ce livre a été réécrit, tandis que la plupart des photos et schémas ont été remplacés.

Des **plaques d'essais à bus unique** sont dorénavant utilisées tout au long de l'ouvrage (comme dans *L'électronique en pratique 2*, paru également aux éditions Eyrolles), afin de réduire le risque d'erreurs de câblage. Ce changement a nécessité un nouveau câblage des circuits, mais je pense que cela en valait la peine.

Des **plans montrant la disposition des composants** ont remplacé les photos des circuits sur plaques d'essais. Je pense que ces plans sont plus clairs.

Les **vues internes des connexions des plaques d'essais** ont été redessinées afin de correspondre aux modifications indiquées ci-dessus.

De **nouvelles photos** des outils et fournitures ont été ajoutées. Pour les éléments de petites dimensions, j'ai utilisé une règle graduée afin de préciser l'échelle.

Quand cela était possible, j'ai utilisé les composants les moins coûteux. J'ai également réduit l'ensemble de ce que vous devez acheter.

Trois expériences ont été totalement revues :

- Le projet des dés électroniques, qui employait des circuits intégrés de la série 74LS, fait maintenant appel à des circuits de la série HC, afin d'être cohérent avec le reste du livre et conforme aux usages récents.
- Le projet qui comportait un transistor unijonction a été modifié en utilisant un multivibrateur astable constitué de deux transistors.
- Le projet traitant des microcontrôleurs emploie désormais des cartes Arduino, très populaires dans la communauté des makers.

Par ailleurs, deux projets faisant intervenir du plastique ABS ont été supprimés, car de nombreux lecteurs les trouvaient peu intéressants.

Enfin, la mise en page de cette seconde édition a été modifiée afin de rendre l'ouvrage plus agréable à lire et mieux adapté aux liseuses. Elle permet également de faciliter les actualisations futures du texte : nous souhaitons en effet que ce livre demeure à jour et utile pour de nombreuses années à venir !

Table des matières

1. Les bases	1
Matériel du chapitre 1	1
Expérience 1 : goûtez à l'électricité !	6
Expérience 2 : maltraitez une pile !	11
Expérience 3 : votre premier circuit	17
Expérience 4 : une résistance variable	20
Expérience 5 : fabriquons une pile	31
2. Principes de commutation	39
Matériel du chapitre 2	39
Expérience 6 : une commutation très simple	48
Expérience 7 : étude d'un relais	56
Expérience 8 : un oscillateur à relais	62
Expérience 9 : le temps et les condensateurs	70
Expérience 10 : un interrupteur à transistor	78
Expérience 11 : son et lumière	85
3. Notions plus avancées	93
Matériel du chapitre 3	93
Expérience 12 : une jonction de deux fils	101
Expérience 13 : grillez une LED !	113
Expérience 14 : une lumière pulsée pour vêtement	115
Expérience 15 : alarme anti-intrusion, première partie	123

4. Circuits intégrés	133
Matériel du chapitre 4	133
Expérience 16 : émission d'une impulsion	137
Expérience 17 : créez un son	146
Expérience 18 : l'alarme d'intrusion (presque) terminée	154
Expérience 19 : testeur de réflexes	167
Expérience 20 : apprentissage de la logique	179
Expérience 21 : un code secret	189
Expérience 22 : une course de vitesse	198
Expérience 23 : hésitations et rebonds	206
Expérience 24 : les dés magiques	211
5. Et après ?	223
Matériel du chapitre 5	223
Personnalisez votre espace de travail	223
Expérience 25 : autour du magnétisme	228
Expérience 26 : un générateur de tension	231
Expérience 27 : démontez un haut-parleur	236
Expérience 28 : faites réagir une bobine	239
Expérience 29 : filtrez certaines fréquences	242
Expérience 30 : autour de la distorsion	251
Expérience 31 : une radio sans soudure ni alimentation	255
Expérience 32 : quand le matériel rencontre le logiciel	261
Expérience 33 : évaluer son environnement	273
Expérience 34 : des dés plus sophistiqués	279
Sujets inexplorés	290
Conclusion	290
6. Outils, composants et fournitures	291
Rechercher et acheter en ligne	291
Listes des fournitures et composants	296
Achat des outils	304
Fournisseurs	306
Index	309
Remerciements	313
À propos de l'auteur	315

Les bases

1

Dans l'expérience 1, je veux que vous goûtiez à l'électricité, littéralement ! Vous allez étudier le courant électrique et découvrir ce qu'est la résistance, pas uniquement sous forme de composants et de fils, mais dans ce qui vous entoure.

Les expériences 2 à 5 vont vous montrer comment mesurer et comprendre la pression et le flux électrique. Pour terminer, vous verrez comment générer de l'électricité avec des objets usuels, sur un coin de table.

Même si vous avez déjà acquis des connaissances en électronique, je vous encourage à réaliser ces expériences avant de vous aventurer dans la suite de ce livre. Elles sont amusantes et permettent de clarifier certains concepts de base.

Matériel du chapitre 1

Chaque chapitre de ce livre commence par une description illustrée des outils, composants et fournitures nécessaires pour réaliser les expériences décrites. Une fois que vous serez familier avec ce type de matériel, vous pourrez consulter le chapitre 6 où est listé tout le matériel requis pour les expériences de cet ouvrage.

J'appelle *outils* le matériel, allant des pinces au multimètre, qui vous sera toujours utile, même en dehors du cadre de cet ouvrage. Les *fournitures*, telles que fils et soudure, seront employées au fil des projets, mais les quantités que je recommande devraient être suffisantes pour toutes les expériences de ce livre. Les *composants* seront listés par projets.

Multimètre



Figure 1-1. Ce type de multimètre à aiguille ne convient pas à votre besoin. Vous devez choisir un multimètre numérique.

Je commence par le multimètre, parce que je considère que c'est l'outil le plus essentiel. Il vous indiquera la tension entre deux points d'un circuit, ou combien de courant traverse un circuit. Il vous aidera à trouver une erreur de câblage et il pourra aussi évaluer un composant, déterminer sa résistance électrique – ou sa capacité, qui représente son pouvoir de stockage d'une charge électrique.

Si vous êtes débutant, ces termes vous paraissent peut-être confus et vous pouvez penser qu'un multimètre est complexe et difficile à utiliser. Ce n'est pas le cas. Il vous facilitera l'apprentissage, car il vous révèle ce que vous ne pouvez pas voir.

Vous ne devez pas acheter un multimètre de type ancien, comportant une aiguille qui se déplace au-dessus d'une échelle graduée (figure 1-1). Il s'agit d'un multimètre *analogique*.

Vous devez vous procurer un multimètre *numérique*, qui affiche numériquement les valeurs. Je vous en présente quatre ci-après.

La figure 1-2 montre le multimètre numérique le moins coûteux que j'ai pu trouver. Il ne permet pas de mesurer des résistances de grandes valeurs ou des tensions très basses, sa précision est faible et il ne mesure pas les capacités. Néanmoins, si votre budget est serré, il vous aidera dans les projets de ce livre.



Figure 1-2. Le multimètre le moins cher.

Le multimètre de la figure 1-3 offre une meilleure précision et plus de possibilités. Un outil de ce type est un excellent choix de départ pour apprendre l'électronique.



Figure 1-3. Tout multimètre similaire à celui-ci est un très bon choix de départ.

L'exemple de la figure 1-4 est un peu plus cher (deux à trois fois plus que celui de la figure 1-3), mais bien mieux fabriqué. Ce modèle particulier n'est plus disponible, mais vous pouvez trouver de nombreux multimètres similaires. Le fabricant Extech, depuis longtemps sur le marché, maintient ses standards de qualité, face à ses concurrents cassant les prix.



Figure 1-4. Multimètre de meilleure qualité, mais plus onéreux.

La figure 1-5 montre le modèle que je préfère, à l'heure où j'écris ces lignes. Il est solide, possède toutes les fonctionnalités que je désire et mesure une large gamme de valeurs avec une excellente précision. Évidemment, il coûte environ vingt fois le prix du modèle le moins cher. Il faut le considérer comme un investissement à long terme.



Figure 1-5. Un produit de grande qualité.

Quel multimètre acheter ?

Pour débiter, vous n'avez pas besoin d'un multimètre coûteux. Cependant, le multimètre le plus économique risque de présenter des limites, par exemple le remplacement difficile de son fusible interne ou, pire, une rapide destruction des contacts de son contacteur rotatif.

Appliquez la règle suivante pour définir un rapport qualité/prix acceptable : cherchez le modèle le moins cher et doublez son prix.

Indépendamment du prix du multimètre, vous devez orienter votre choix d'achat en fonction des caractéristiques et fonctionnalités suivantes.

Les gammes

Un multimètre peut mesurer une multitude de valeurs. Il lui faut posséder un moyen de limiter ses mesures. Certains appareils ont des *gammes manuelles* : c'est vous qui choisissez le domaine correspondant à la valeur qui vous intéresse en tournant un bouton.

D'autres multimètres possèdent des *gammes automatiques*, ce qui est plus pratique car vous n'avez qu'à connecter l'appareil et attendre qu'il détermine tout de lui-même. Le mot-clé, cependant, est « attendre ». À chaque mesure, avec un multimètre automatique, vous devez attendre quelques secondes pour qu'il évalue la valeur. Personnellement, j'ai tendance à être impatient, c'est pourquoi je préfère les multimètres manuels. Autre problème des multimètres à gammes automatiques, puisque vous n'avez pas vous-même choisi la gamme de mesure, vous devez réaliser quelle unité il a décidé d'utiliser. Par exemple, la différence entre K et M lors de la mesure d'une résistance électrique est un facteur 1 000.

Je vous suggère d'utiliser un multimètre à gamme manuelle pour vos premières expériences. Vous aurez ainsi moins de risques de commettre des erreurs et cela vous coûtera moins cher.

Normalement, on devrait vous préciser en magasin si un multimètre offre le choix automatique ou manuel de la gamme de mesure. Dans le cas contraire, une photo de son commutateur de sélection devrait vous permettre de le déterminer. Le multimètre de la figure 1-4 propose la sélection automatique des gammes de mesure, à la différence des autres multimètres présentés ici.

Valeurs mesurées

Le bouton de sélection vous indique également le type de mesures possibles. Au minimum, vous pouvez espérer les fonctions suivantes.

- **Volt (V), ampère (A) et ohm (Ω)** (voir figure 1-6). Vous ne savez peut-être pas encore ce que signifient ces paramètres, mais ils sont fondamentaux.

Votre multimètre doit aussi être capable de mesurer des milliampères (mA) et des millivolts (mV). Cela n'est pas toujours visible sur le bouton de sélection, mais doit figurer dans ses caractéristiques.



Figure 1-6. Trois exemples du symbole oméga, utilisé pour représenter l'ohm, unité de résistance électrique.

- **DC/AC** (*Direct Current/Alternating Current*), plus fréquemment utilisés pour le marquage des cadrans de multimètres que leurs homologues francisés CC/CA (Courant continu/Courant alternatif). Ces options peuvent être choisies à l'aide d'un bouton-poussoir DC/AC ou à partir du bouton rotatif principal. Un bouton-poussoir est plus pratique.
- **Test de continuité.** C'est une fonction pratique, qui vous permet de vérifier les mauvaises connexions ou les coupures d'un circuit électrique. Idéalement, un signal sonore devrait être émis lors du test. Dans ce cas, il sera représenté par un symbole en forme de point entouré par des lignes semi-circulaires, comme illustré sur la figure 1-7.



Figure 1-7. Ce symbole indique la fonction de test de continuité de circuit, avec retour sonore. C'est une fonction très pratique.

Pour un faible coût supplémentaire, vous pourrez acheter un multimètre qui réalise les mesures suivantes, dans l'ordre d'importance :

- **Capacitance.** Les condensateurs sont des petits composants nécessaires dans la majorité des circuits électroniques. Habituellement, la valeur des plus petits n'est pas marquée sur leur corps. La possibilité de les mesurer peut donc être importante, particulièrement lorsqu'ils sont mélangés ou tombés de leur boîte. Les multimètres bas de gamme n'offrent généralement pas cette possibilité. Lorsqu'elle existe, cette fonction est généralement indiquée par la lettre F signifiant farad, leur unité de mesure. L'abréviation CAP est parfois utilisée.
- **Test des transistors,** indiqué par la présence de petits trous marqués E, B, C et E. Vous devez enficher votre transistor dans ces trous. Cela vous permet de vérifier la façon dont le transistor doit être incorporé dans un circuit, ou s'il est hors service.
- **Fréquence (Hz).** C'est une fonction peu importante pour les expériences de ce livre, mais qui pourrait en revanche vous être utile si vous envisagez de poursuivre l'acquisition de vos connaissances.

Toute autre fonction est sans intérêt.

Si vous êtes toujours indécis au sujet du choix du multimètre à acheter, poursuivez la lecture de ce livre afin d'avoir une meilleure idée de la façon dont cet appareil va être utilisé dans les expériences 1, 2, 3 et 4.

Lunettes de sécurité

Pour l'expérience 2, vous souhaitez peut-être utiliser des lunettes de sécurité. Le modèle en plastique le moins cher conviendra pour cette simple aventure ; en effet, le risque d'explosion d'une pile est quasiment inexistant et il ne se produirait pas avec force.

Des lunettes de vue traditionnelles représentent une alternative acceptable. Vous pourrez également regarder l'expérience au travers d'un morceau de plastique transparent (par exemple, découpé dans une bouteille en plastique).

Piles et connecteurs

Les piles et leurs connecteurs étant partie intégrante d'un circuit, je les classe comme composants (voir chapitre 6).

Pratiquement toutes les expériences de ce livre utilisent une source d'alimentation électrique de 9 V. Une pile ordinaire suffira pour commencer. Par la suite, je conseillerai un adaptateur secteur, mais vous n'en avez pas encore besoin.

Pour l'expérience 2, il vous faudra une paire de piles de type AA (ou LR6). Ces piles devront être alcalines ; vous ne devrez pas réaliser cette expérience avec une batterie rechargeable, quelle qu'elle soit.

Afin de relier la batterie au circuit, vous aurez besoin d'un connecteur pour la pile de 9 V (figure 1-8), ainsi que d'un support pour une seule pile AA (figure 1-9). Un seul support sera suffisant, mais je vous suggère de vous procurer au moins trois connecteurs de pile 9 V pour un usage futur.



Figure 1-8. Connecteur permettant de relier une pile de 9 V.

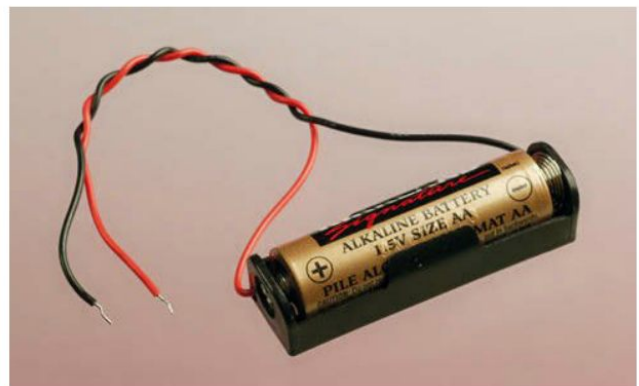


Figure 1-9. Vous aurez besoin d'un support tel que celui-ci pour une pile AA. Évitez d'utiliser un coupleur de piles.

Cordons de test

Vous utiliserez des cordons de test afin de relier les composants entre eux dans les premières expériences. Les cordons que je préconise possèdent une *pince crocodile* à chacune des extrémités de leur fil (figure 1-10). Chaque pince permet de réaliser une liaison en se greffant sur quelque chose et en y demeurant solidement attaché, libérant ainsi vos mains.

Vous ne devez pas utiliser de cordons possédant une fiche à chaque extrémité. Ils sont parfois appelés *fils de pontage*.

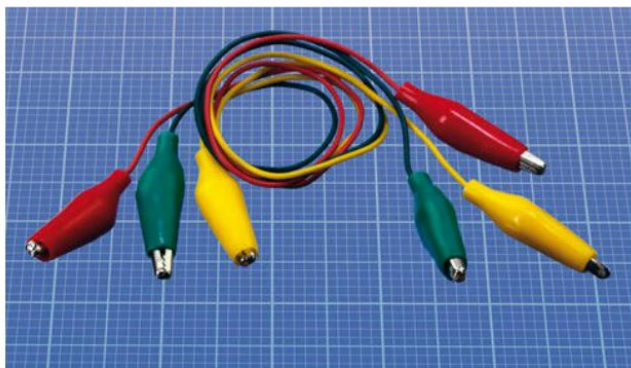


Figure 1-10. Cordons de test équipés d'une pince crocodile à chaque extrémité.

Dans ce livre, les cordons de test sont classés dans les outils (voir chapitre 6).

Potentiomètre



Figure 1-11. Potentiomètres ordinaires nécessaires pour les premières expériences.

Un potentiomètre fonctionne à la manière du réglage de volume d'une chaîne stéréo ancienne. Les modèles représentés sur la figure 1-11 sont considérés comme volumineux selon les normes récentes, mais c'est ce dont vous avez besoin, car ils peuvent recevoir les pinces crocodiles des cordons de test. Un potentiomètre d'environ 2,5 cm de diamètre est à préférer. Sa résistance doit être de 1K.

Fusibles

Un fusible interrompt un circuit si trop de courant électrique le traverse. Il est conseillé de vous procurer des fusibles utilisés dans les automobiles, prévus pour une intensité de 3 A (figure 1-12) et qui sont également faciles à relier aux cordons de test. De plus, il est facile d'observer l'élément à l'intérieur. Les fusibles pour automobiles sont vendus selon une grande variété de tailles, mais à condition de choisir des fusibles de 3 A, leurs dimensions importent peu. Achetez-en trois afin de prévenir leur destruction volontaire ou accidentelle. Si vous préférez, un fusible à cartouche en verre de 3 A comme celui de la figure 1-13 conviendra, bien qu'il soit plus difficile à utiliser (disponible chez les revendeurs de composants électroniques).



Figure 1-12. Ce type de fusible pour automobile est plus facile à manipuler que les fusibles à cartouche utilisés dans les équipements électroniques.



Figure 1-13. Vous pouvez utiliser un fusible à cartouche tel que celui-ci, mais les pinces crocodiles ne s'y agripperont pas très facilement.

Diodes

Plus communément appelées LED, elles se présentent sous différentes formes et dimensions. Celles que nous allons utiliser sont des voyants souvent appelés *LED standards à fils* dans les catalogues. L'exemple de la figure 1-14 a un diamètre de 5 mm, mais un diamètre de 3 mm est parfois plus facile à loger dans un circuit où la place est limitée. L'une ou l'autre conviendra.



Figure 1-14. Diode (LED) de diamètre 5 mm.

Tout au long de ce livre, je me référerai aux *LED génériques*. Cela sous-entend les moins chères, n'émettant pas une forte intensité lumineuse et couramment disponibles en couleur rouge, jaune ou verte. Elles sont souvent vendues par petit lot et utilisées dans tellement d'applications que je vous suggère d'en acheter au moins une douzaine.

Certaines LED génériques sont enrobées par une résine plastique transparente mais elles émettent une lumière de couleur lorsqu'un courant leur est appliqué. D'autres

LED sont encapsulées dans un matériau de couleur identique à celle de leur flux lumineux. N'importe quel type conviendra.

Dans quelques expériences, des *LED à faible intensité* seront préférables (voir chapitre 6). Elles sont un peu plus coûteuses, mais sont plus sensibles. Par exemple, dans l'expérience 5, où vous allez générer une faible intensité électrique à l'aide d'une pile improvisée, vous obtiendrez un meilleur résultat avec une LED à faible intensité.

Résistances

Vous aurez besoin de résistances de plusieurs valeurs afin de limiter la tension et l'intensité dans diverses parties de vos circuits. Elles ressemblent à celles de la figure 1-15. La couleur de leur corps n'a pas d'importance. Par la suite, nous étudierons le code couleur des anneaux indiquant la valeur.



Figure 1-15. Deux résistances de $\frac{1}{4}$ W correspondant au type dont vous aurez besoin.

Il est inutile de vous limiter aux valeurs listées dans chaque expérience : achetez un assortiment de résistances courantes (voir chapitre 6).

Vous n'aurez pas besoin d'autres composants pour réaliser les expériences 1 à 5. Alors commençons !

Expérience 1 : goûtez à l'électricité !

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V
- 1 multimètre



Pas plus de 9 V !

Pour cette expérience, vous devez utiliser uniquement une pile de 9 V. N'essayez pas avec une tension supérieure, n'utilisez pas une pile plus grosse pouvant délivrer davantage de courant. Par ailleurs, si vous avez des attaches métalliques sur les dents, soyez prudents de ne pas les toucher avec la pile. Plus important, n'appliquez jamais le courant électrique d'une pile de taille quelconque sur une plaie de votre peau.

Procédure

Après avoir humidifié votre langue, mettez-la en contact avec les deux bornes de la pile, comme sur la figure 1-16.



Figure 1-16. Un amateur intrépide testant les caractéristiques d'une pile alcaline.

Ressentez-vous ce picotement ? Maintenant, laissez de côté la pile, tirez la langue puis, essayez son extrémité pour l'assécher avec précaution en utilisant un mouchoir. Touchez à nouveau les bornes de la pile avec votre langue, vous devriez ressentir un picotement plus faible.

Que se passe-t-il ? Vous pouvez utiliser votre multimètre pour le savoir.

Réglez votre multimètre

Votre multimètre possède-t-il une pile préinstallée ? Sélectionnez n'importe quelle fonction avec le bouton rotatif, regardez alors si l'écran affiche un nombre. Si rien n'est visible, vous devez ouvrir le multimètre et y insérer une pile convenable avant de pouvoir l'utiliser. Pour savoir comment faire, reportez-vous à la notice qui accompagne votre appareil.

Les multimètres sont fournis avec un cordon de couleur rouge et un de couleur noire. Chaque fil possède une fiche à une de ses extrémités et une pointe de mesure (appelée aussi pointe de touche) à l'autre. Insérez les fiches dans le multimètre, puis reliez les pointes de touche aux parties du circuit où vous désirez savoir ce qui se passe (figure 1-17). Les pointes détectent l'électricité ; elles ne génèrent rien de significatif. Lorsque vous intervenez sur les circuits des expériences, qui mettent en jeu des tensions et intensités de faibles valeurs, les pointes de touche ne peuvent pas vous provoquer de choc (à moins que vous ne vous blessiez avec leur extrémité pointue).

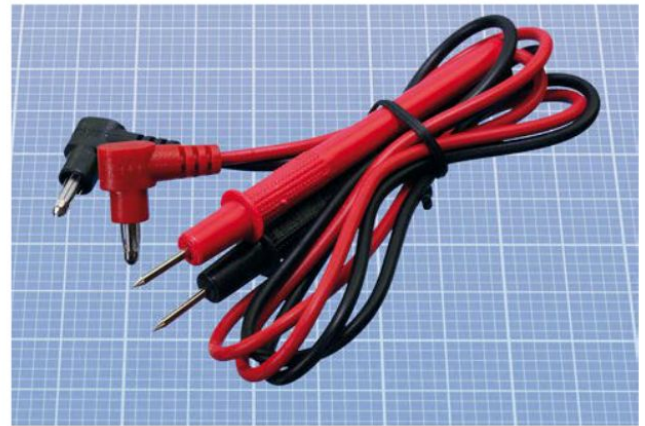


Figure 1-17. Cordons d'un multimètre, se terminant par des pointes métalliques.

Les multimètres possèdent pour la plupart trois connecteurs femelles, quelquefois quatre (figures 1-18, 1-19 et 1-20).

Voici les règles générales :

- Une des connexions devrait être marquée COM. C'est le point commun pour toutes les mesures. Insérez-y le cordon noir et laissez-le en place.

- Une autre connexion devrait être identifiée par le symbole Ω , ainsi que la lettre V. Elle sert pour la mesure des résistances et des tensions. Insérez le cordon rouge dans cet emplacement.
- Parfois, la connexion tension/résistance peut également être utilisée pour la mesure des faibles intensités en mA... ou un autre point de connexion existe pour cela, nécessitant que vous déplaciez parfois le fil rouge. Nous y reviendrons.
- Un connecteur additionnel pouvant être marqué 2 A, 5 A, 10 A, 20 A ou quelque chose de similaire, indiquant une valeur maximale en ampères, peut être à utiliser pour la mesure d'intensités élevées. Nous n'en aurons pas besoin pour les projets de ce livre.



Figure 1-18. Remarquez le marquage des connecteurs de ce multimètre.



Figure 1-19. Les connecteurs de ce multimètre sont présentés différemment.



Figure 1-20. Autre exemple de connecteurs d'un multimètre.

Fondamentaux : les ohms

Vous allez évaluer la valeur de la résistance de votre langue. Mais qu'est-ce donc qu'un ohm ?

On mesure les distances en kilomètres, les masses en kilogrammes et les températures en degrés centigrades. De façon similaire, on mesure la résistance électrique en ohms, une unité internationale utilisée en hommage à Georg Simon Ohm, qui était un pionnier de l'électricité.

Le symbole grec Ω indique des ohms. Cependant, pour des résistances supérieures à 999 Ω , la lettre majuscule K est utilisée, signifiant kilo-ohm (ou kilohm) et équivalant à un millier d'ohms. Par exemple, une résistance de 1 500 Ω sera notée 1,5K.

Au-dessus de 999 999 Ω , la lettre majuscule M est utilisée, signifiant mégaohm (ou mégohm), représentant un million d'ohms et souvent appelée *meg* dans le langage technique courant.

La figure 1-21 montre une table de conversion.

Ohms	Kilo-ohms	Mégaohms
1 Ω	0,001K	0,000 001M
10 Ω	0,01K	0,000 01M
100 Ω	0,1K	0,000 1M
1 000 Ω	1K	0,001M
10 000 Ω	10K	0,01M
100 000 Ω	100K	0,1M
1 000 000 Ω	1 000K	1M

Figure 1-21. Table de conversion des multiples communs de l'ohm.

En Europe, les lettres R, K ou M se substituent à la virgule, afin de réduire le risque d'erreurs. Ainsi, dans un schéma de circuit européen, 5K6 signifie 5,6K, 6M8 signifie 6,8M et 6R8 signifie 6,8 Ω . Je n'utiliserai pas cette notation dans ce livre, mais vous pourrez la rencontrer dans certains schémas d'autres sources.

Un matériau qui présente une résistance très élevée au passage du courant électrique est appelé un *isolant*. La plupart des plastiques ainsi que les gaines colorées des câbles sont des isolants.

Un matériau ayant une résistance très faible est un *conducteur*. Les métaux tels que le cuivre, l'aluminium, l'argent et l'or sont d'excellents conducteurs.

Résistance de votre langue

Observez le commutateur rotatif de votre multimètre, vous devriez trouver au moins une position identifiée par le symbole Ω . Sur un multimètre à gamme automatique, pointez le bouton vers le symbole Ω comme le montre la figure 1-22, appliquez délicatement les pointes de touche sur votre langue et attendez que le multimètre choisisse automatiquement la gamme de mesure. Vérifiez l'apparition de la lettre K sur l'écran.



Figure 1-22. Sur un multimètre à gamme automatique, tournez simplement le bouton vers le symbole Ω .

Sur un multimètre manuel, vous devez choisir la gamme de mesure appropriée. Pour votre langue, vous choisirez probablement 200K (200 000 Ω). Notez que les nombres gravés autour du bouton rotatif sont des valeurs maximales ; ainsi, 200K signifie « pas plus de 200 000 Ω » et 20K signifie « pas plus de 20 000 Ω » (figures 1-23 et 1-24).



Figure 1-23. Un multimètre manuel nécessite que vous choisissiez la gamme de mesure.



Figure 1-24. Avec un multimètre manuel différent, le principe reste le même.

Mettez les pointes de touche en contact avec votre langue en les éloignant d'environ 2,5 cm. Notez la valeur indiquée par le multimètre, qui devrait avoisiner 50K. Retirez les pointes de mesure, tirez la langue et utilisez un mouchoir pour la sécher avec précaution, comme précédemment. Sans laisser votre langue s'humidifier, répétez le test précédent, la valeur lue devrait être plus élevée. Si vous utilisez un multimètre manuel, vous devrez peut-être choisir une gamme plus élevée pour faire la mesure.

Quand votre peau est humide, sa résistance électrique diminue. Ce principe est utilisé par les détecteurs de mensonge car une personne qui ment, en condition de stress, transpire plus abondamment.

Voici la conclusion que votre test permet d'apporter. Une plus faible résistance permet le passage d'un courant plus important. Ainsi, durant le test initial de votre langue, un courant plus élevé avait provoqué un picotement plus important.

Fondamentaux : à l'intérieur d'une pile

Lorsque vous avez utilisé la pile pour le premier test de votre langue, je n'ai pas pris le temps d'expliquer comment elle fonctionne. Il est temps que je rectifie cet oubli.

Une pile de 9 V contient des produits chimiques qui libèrent des électrons (particules chargées d'électricité). Ceux-ci, suite à une réaction chimique interne, circulent d'une électrode à l'autre. Imaginez deux réservoirs d'eau, l'un rempli et l'autre vide. Si les réservoirs sont reliés ensemble par un tuyau et un robinet, l'eau circulera de l'un vers l'autre jusqu'à ce que leurs niveaux soient égaux (figure 1-25). De même, lorsque vous établissez un circuit électrique entre les deux pôles d'une pile, les électrons passent de l'un vers l'autre, même si le circuit se limite à l'humidité de votre langue.

Les électrons circulent plus facilement au travers de certaines substances (langue humide) que d'autres (langue sèche).

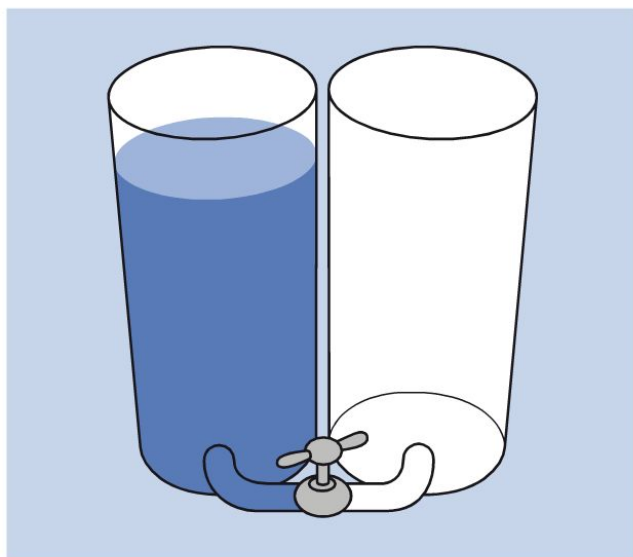


Figure 1-25. Vous pouvez imaginer une pile comme deux réservoirs d'eau reliés entre eux.

Approfondissons

Le test de votre langue n'était pas facilement maîtrisable car la distance entre les pointes de mesure pouvait varier d'une mesure à l'autre. Pensez-vous que cela puisse avoir un impact ? Essayons de le déterminer.

Maintenez les pointes de votre multimètre de façon à ce qu'elles soient à 2,5 cm l'une de l'autre. Appliquez-les sur votre langue humide. Éloignez maintenant les pointes de 5 cm et essayez à nouveau. Quelles valeurs avez-vous obtenues à l'aide de votre multimètre ?

Lorsque l'électricité parcourt une distance plus courte, elle rencontre moins de résistance. De ce fait, le courant augmente.

Répétez la même expérience avec votre bras (figure 1-26). Faites varier la distance entre les pointes de mesure par pas égaux, par exemple de 2,5 cm, et notez la résistance indiquée par votre multimètre. Pensez-vous qu'en doublant la distance entre vos pointes de touche, la résistance indiquée par votre multimètre va doubler ? Comment le prouver ?

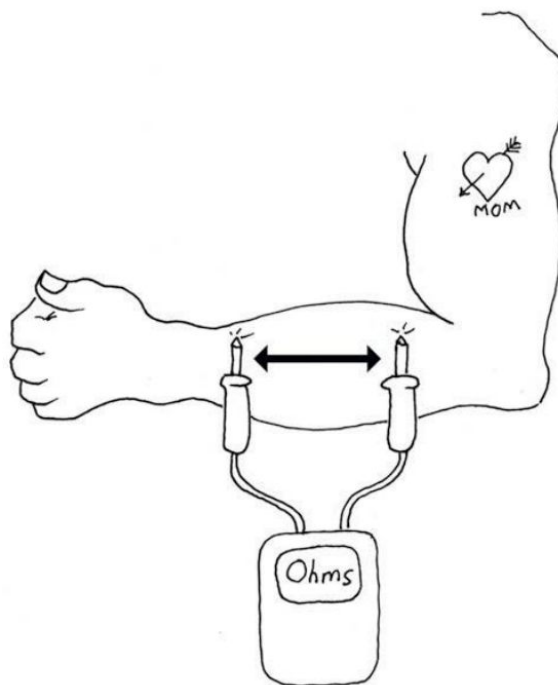


Figure 1-26. Faites varier la distance entre les pointes de mesure et notez les valeurs lues sur votre multimètre.

Si la résistance que votre multimètre doit mesurer est trop importante, vous verrez apparaître un message d'erreur, comme la lettre L, au lieu d'une valeur numérique. Essayez de mouiller votre peau et répétez le test ; vous devriez alors obtenir une valeur. En fonction de l'évaporation de l'eau sur votre peau, sa résistance va changer. Vous voyez comme il est difficile de contrôler tous les paramètres lors d'une expérience. Les paramètres aléatoires sont connus sous la dénomination de *variables incontrôlables*.

Il subsiste une variable dont je n'ai pas encore parlé : c'est la pression exercée par chaque pointe de mesure sur la peau. Si vous appuyez plus fortement, la résistance devrait diminuer. Pouvez-vous le démontrer ? Quelle expérience pourriez-vous réaliser permettant d'éliminer cette variable ?

Si vous vous lassez de la mesure de la résistance de votre peau, essayez de plonger les pointes de touche dans un verre d'eau. Ensuite, faites dissoudre du sel dans l'eau et mesurez à nouveau. Je suppose que vous avez déjà entendu dire que l'eau conduit l'électricité ; la raison n'en est pas si simple. Les impuretés de l'eau jouent un rôle important.

À votre avis, que va-t-il se passer si vous mesurez la résistance d'une eau sans aucune impureté ? La première étape consistera à obtenir une eau pure. L'eau purifiée possède en général des minéraux ajoutés après purification ; ce n'est donc pas ce dont vous avez besoin. L'eau de source non plus n'est pas totalement pure. Ce qu'il vous faut, c'est de l'eau distillée. Vous constaterez que sa résistance, par centimètre d'espacement entre les pointes, est supérieure à celle de votre langue. Essayez pour le vérifier.

Historique : l'homme qui a découvert la résistance

Georg Simon Ohm est né en Bavière en 1787 et a travaillé dans l'ombre la majeure partie de sa vie. Il a étudié la nature de l'électricité à partir de fils métalliques qu'il fabriquait lui-même.

Malgré des moyens limités et de faibles connaissances en mathématiques, Ohm parvient à démontrer, en 1827, qu'une part de la résistance d'un conducteur, tel que le cuivre, est inversement proportionnelle à l'aire de sa section et que le courant qui la traverse est proportionnel à la tension, dans des conditions de température constante. Quatorze ans plus tard, la Royal Society of London reconnaît l'importance de ses travaux et le récompense de la Médaille Copley. Aujourd'hui, sa découverte est connue sous le nom de *loi d'Ohm* (voir expérience 4).



Figure 1-27. Georg Simon Ohm, après avoir été honoré pour son travail de pionnier, effectué dans l'ombre en bonne part.

Nettoyage et recyclage

Votre pile ne devrait pas avoir été endommagée ou déchargée de façon importante par cette expérience. Vous pouvez à nouveau l'utiliser.

N'oubliez pas d'éteindre le multimètre avant de le ranger !

Expérience 2 : maltraitez une pile !

Pour mieux appréhender la puissance électrique, vous allez maintenant réaliser ce que la plupart des livres déconseillent : créer un court-circuit à l'intérieur de la pile, à savoir une mise en connexion directe entre les deux pôles d'une source d'alimentation.

Attention : utilisez une pile de faible puissance

Certains courts-circuits peuvent être très dangereux. Ne court-circuitez jamais une prise électrique de votre habitation : cela provoquerait un fort claquement accompagné d'un éclair lumineux, le fil ou l'outil utilisé serait

partiellement fondu et des particules de métal en fusion pourraient vous brûler.

Si vous court-circuitiez la batterie d'une voiture, le flux de courant serait si important que la batterie pourrait même exploser en vous aspergeant d'acide. Demandez plutôt au type de la figure 1-28 (s'il est encore capable de vous répondre).



Figure 1-28. Laisser tomber accidentellement une clé anglaise sur les bornes d'une batterie de voiture est dangereux pour votre santé. Certains courts-circuits peuvent être dramatiques, même avec une batterie de 12 V si elle est de taille importante.

Des batteries au lithium se trouvent fréquemment dans les outils et appareils portables. Ne court-circuitiez jamais une telle batterie. Certaines se sont enflammées, même en l'absence de court-circuit, comme le montre la figure 1-29. Après que certains des premiers ordinateurs portables ont été ainsi détruits, des modifications ont été apportées aux batteries afin d'éviter ce type de problème. Toutefois, les court-circuits restent une très mauvaise idée.

N'utilisez qu'une pile alcaline pour cette expérience et uniquement une pile de type AA (LR06). Vous pouvez également porter des lunettes de protection, si vous n'êtes pas sûr de l'état de votre pile.



Figure 1-29. Ne plaisantez jamais avec les batteries au lithium.

De quoi avez-vous besoin ?

- 2 piles AA de 1,5 V
- 1 support de pile
- 2 fusibles de 3 A
- 1 paire de lunettes de protection (des lunettes traditionnelles ou solaires feront l'affaire)
- 2 fils de test avec des pinces crocodiles à chaque extrémité

Génération de chaleur

Utilisez uniquement une pile alcaline. N'utilisez en aucune façon une pile rechargeable ou un accumulateur.

Placez la pile dans son support se terminant par deux fils et reliez les extrémités dénudées des fils en les torsadant (figure 1-30). Au départ, rien ne semble se produire. Attendez environ une minute, vous constaterez alors que les fils deviennent chauds. Attendez encore une minute et la pile s'échauffera également.

La chaleur est due au courant électrique qui traverse les fils et au travers de l'électrolyte (le fluide conducteur) présent à l'intérieur de la pile. Si vous avez déjà utilisé une pompe pour gonfler les pneus d'une bicyclette, vous savez que la pompe s'échauffe. L'électricité se comporte de façon similaire. Les particules (électrons) chauffent le fil en le traversant.

Les réactions chimiques à l'intérieur d'une pile libèrent les électrons, créant une pression électrique : la *tension*. Elle est mesurée en volts et ainsi nommée en hommage à Alexandre Volta, un autre pionnier de l'électricité.



Figure 1-30. Court-circuiter une pile alcaline sera sans danger si vous suivez attentivement les instructions.

Reprenons l'analogie avec l'eau : la pression de l'eau dans un récipient est proportionnelle à sa hauteur et se compare à la tension (figure 1-31).

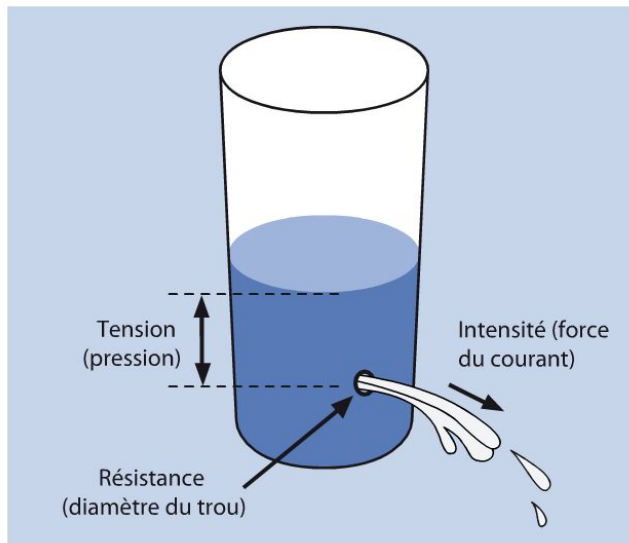


Figure 1-31. La pression dans un réservoir d'eau est analogue à la tension d'une source d'électricité.

La tension n'explique cependant que la moitié du phénomène. La quantité d'électrons qui passent au travers d'un fil, en un temps donné est appelée l'intensité ou ampérage, en hommage à un autre pionnier de l'électricité, André-Marie Ampère. Ce flux est également appelé courant. Le courant – l'intensité – génère de la chaleur.

- Représentez-vous la tension comme une pression.
- Imaginez l'ampérage comme étant la grandeur d'un flux, appelé intensité ou courant.

Pourquoi votre langue ne brûle pas ?

Lorsque vous avez appliqué les bornes de la pile 9 V sur votre langue, vous avez ressenti un picotement mais aucune chaleur. En court-circuitant une pile, vous avez généré une quantité de chaleur perceptible, même en utilisant une simple pile de 1,5 V. Comment expliquer cela ?

Votre multimètre vous a montré que la résistance de votre langue est très élevée et réduit le flux d'électrons. Entre les deux bornes d'une pile, le courant qui traverse le fil électrique est plus important que celui qui traversait votre langue et il crée plus de chaleur. En supposant que les autres paramètres demeurent constants :

- une résistance plus faible permet le passage d'un courant plus intense.
- la chaleur dégagée par l'électricité est proportionnelle à la quantité d'électricité (courant ou intensité) qui traverse le conducteur en une période de temps donnée. En réalité, la résistance d'un fil varie lorsqu'il s'échauffe, mais le principe reste exact.

Rappel de quelques concepts élémentaires :

- l'intensité du courant se mesure en *ampères* (A).
- la pression de l'électricité qui provoque le flux se mesure en *volts* (V).
- la résistance au courant s'exprime en *ohms* (Ω).
- plus la résistance est grande, moins le courant circule.
- une tension plus élevée permet de lutter contre la résistance et augmente l'intensité.

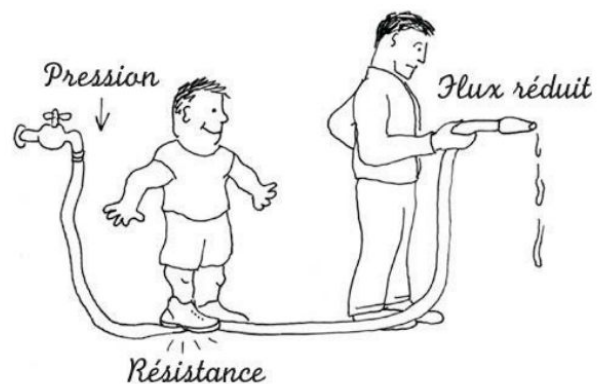


Figure 1-32. La résistance bloque la pression et réduit le flux pour l'eau comme pour l'électricité.

Fondamentaux : les volts

Le volt est une unité internationale représentée par un V majuscule. Aux États-Unis et en Europe, le courant électrique alternatif (CA) des habitations est délivré sous une tension de 110 V ou 220 V. Les composants des appareils électroniques nécessitent des tensions continues (CC) d'environ 5 V à 20 V, certains composants modernes montés en surface utilisant même des tensions inférieures à 2 V. D'autres éléments, comme les microphones, délivrent des tensions se mesurant en millivolts (mV). Lorsque l'électricité est véhiculée sur de longues distances, elle se mesure en kilovolts (kV). Quelques lignes à très longue distance utilisent même des mégavolts. La figure 1-33 est une table de conversion entre millivolts, volts et kilovolts.

Millivolts	Volts	Kilovolts
1 mV	0,001 V	0,000 001 kV
10 mV	0,01 V	0,000 01 kV
100 mV	0,1 V	0,000 1 kV
1 000 mV	1 V	0,001 kV
10 000 mV	10 V	0,01 kV
100 000 mV	100 V	0,1 kV
1 000 000 mV	1 000 V	1 kV

Figure 1-33. Table de conversion des multiples du volt les plus usuels.

Fondamentaux : les ampères

L'ampère est une unité internationale, dont le symbole est un A majuscule. Un appareil électroménager peut consommer plusieurs ampères ; le disjoncteur de protection est parfois de 20 A. Les composants électroniques consomment souvent des intensités exprimées en milliampères (mA). Des composants comme les écrans à cristaux liquides peuvent consommer quelques microampères (μA).

Microamps	Milliamps	Amps
1 μA	0,001 mA	0,000 001 A
10 μA	0,01 mA	0,000 01 A
100 μA	0,1 mA	0,000 1 A
1 000 μA	1 mA	0,001 A
10 000 μA	10 mA	0,01 A
100 000 μA	100 mA	0,1 A
1 000 000 μA	1 000 mA	1 A

Figure 1-34. Table de conversion des multiples de l'ampère les plus usuels.

Comment détruire un fusible

Pouvez-vous mesurer l'intensité qui traverse les fils du support d'une pile lorsque vous provoquez un court-circuit ?

Ce n'est pas facile car, prendre la mesure d'une intensité élevée avec votre multimètre risquerait de griller le fusible de protection qui se trouve à l'intérieur. Ainsi, en plus du multimètre, nous allons utiliser un fusible de 3 A, que nous pouvons sacrifier.

Pour commencer, inspectez un fusible pour automobile à l'aide d'une loupe. Vous devez apercevoir une petite pièce de métal en forme de S comportant une section qui fond facilement (figure 1-12). C'est le même principe dans un fusible à cartouche en verre.

Retirez la pile de 1,5 V de son support, elle n'est plus utilisable et devra être recyclée. Séparez les deux fils précédemment torsadés et utilisez deux fils de test pour relier un fusible au support, comme sur les figures 1-35 et 1-36. Observez le fusible tout en insérant une pile neuve dans le support. Une coupure doit se produire au centre de l'élément, là où le métal a fondu (figures 1-37 et 1-38).

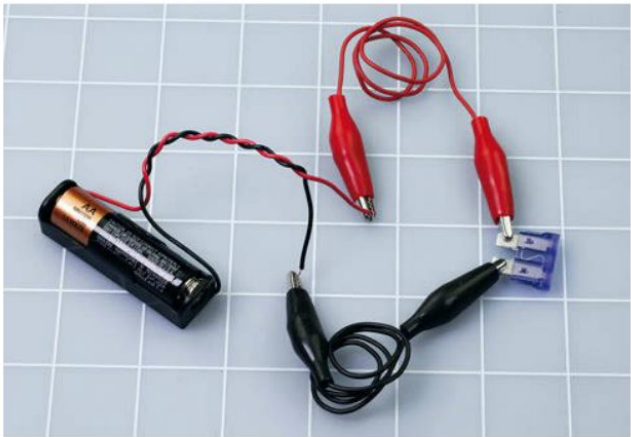


Figure 1-35. Court-circuit d'un fusible automobile.

Certains fusibles de 3 A grillent plus facilement que d'autres, en dépit d'une valeur de protection équivalente. Si vous pensez que votre fusible n'a pas grillé, essayez de le relier directement aux bornes de la pile. Si vous n'utilisez pas une pile AA neuve, vous devrez peut-être attendre quelques secondes pour que le fusible soit détruit. Si tout cela échoue, essayez avec une pile C (LR14) ou D (LR20) qui ont la même tension qu'une pile AA mais peuvent délivrer une intensité plus importante. Ceci ne devrait pas être nécessaire.

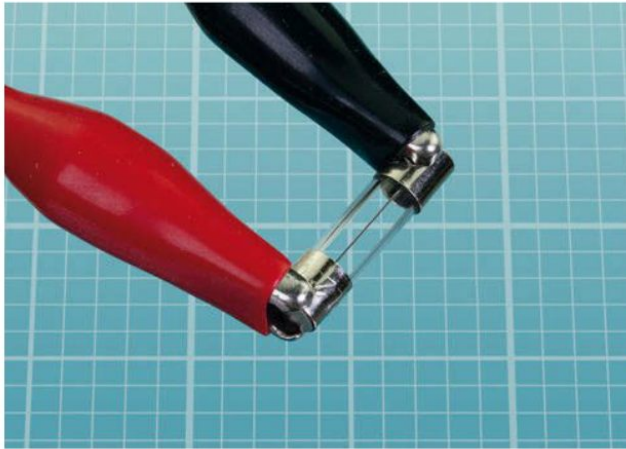


Figure 1-36. Court-circuit d'un fusible à cartouche en verre.



Figure 1-37. Fusible de 3 A qui a fondu sous l'effet du courant électrique.



Figure 1-38. Court-circuit d'un fusible à cartouche en verre.

Voici comment un fusible fonctionne : il fond afin de protéger le reste du circuit. La petite coupure, à l'intérieur du fusible, empêche tout courant de circuler.

Fondamentaux : courant continu et courant alternatif

Le courant généré par une pile est appelée *courant continu* (CC en abrégé et *DC* pour *Direct Current*, en anglais). Comme l'eau qui s'écoule d'un robinet, c'est un flux continu et unidirectionnel.

Le courant disponible sur une prise de courant domestique est très différent. La borne de phase présente une tension qui varie d'une valeur positive à une valeur négative par rapport à la borne du neutre, à un rythme de 50 fois par seconde. C'est ce qu'on appelle le *courant alternatif* (abrégé CA, ou AC pour *Alternating Current*, en anglais).

Le courant alternatif est essentiel dans certains cas, par exemple pour accroître la tension et permettre la distribution de l'électricité sur de longues distances ou dans les moteurs et les appareils domestiques.

Les éléments constituant une prise de courant sont représentés sur la figure 1-39. Ce style de prise se rencontre notamment en Europe ; aux États-Unis, en Amérique du Sud et au Japon, les prises ont une forme différente, mais le principe reste le même.

Sur la figure, la borne A est la borne de « phase » qui délivre la tension alternative de façon positive et négative par rapport à la borne B qui est le « neutre ». Si un appareil présente un défaut, par exemple un fil volant qui toucherait l'intérieur de son boîtier métallique, il doit vous protéger en provoquant l'écoulement de la tension par la borne C de la prise qui est reliée à la « terre ».

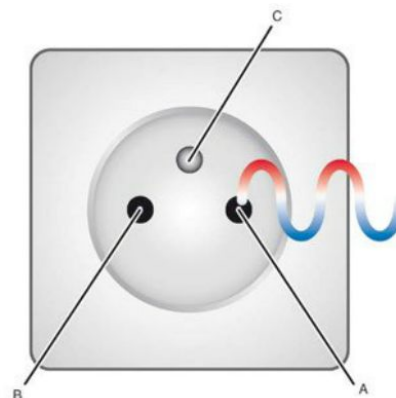


Figure 1-39. Les bornes d'une prise de courant.

En France, la prise de courant de cette illustration est utilisée pour des tensions de 220 volts. D'autres types de prises existent pour des tensions plus élevées ; elles comportent toujours une borne de phase, une neutre et une pour la liaison à la terre, à l'exception des prises prévues pour les appareils triphasés, principalement utilisés dans l'industrie.

Dans ce livre, je parlerai principalement du courant continu car, d'une part, les appareils électroniques simples sont alimentés par une tension continue et, d'autre part, son comportement est plus facile à comprendre. Je ne mentionnerai plus qu'il s'agit de courant continu de façon répétitive. Considérez qu'il s'agit toujours de courant continu sauf si je précise qu'il en est autrement.

Historique : l'invention de la pile

Alessandro Volta (figure 1-40) est né en Italie en 1745, bien avant que la science ne soit organisée en spécialités. Après avoir étudié la chimie (il a découvert le méthane en 1776), il devint professeur de physique et développa un intérêt pour ce qu'il appela la réponse galvanique, mettant en évidence la contraction de la cuisse d'une grenouille recevant une décharge d'électricité statique.



Figure 1-40. Alessandro Volta a découvert qu'une réaction chimique peut produire de l'électricité.

En utilisant un verre rempli d'eau salée, Volta mit en évidence la réaction chimique entre deux électrodes (l'une en cuivre, l'autre en zinc) générant un courant électrique constant. En 1800, il perfectionna son appareil en empilant les plaques de cuivre et de zinc séparées par des feuilles de carton trempées dans de l'eau et du sel. Cette structure « voltaïque » a été la première pile électrique de la civilisation occidentale.

Historique : le père de l'électromagnétisme

Né en France en 1775, André-Marie Ampère (figure 1-41) était un mathématicien prodige qui devint professeur de sciences, alors qu'il s'était principalement éduqué par lui-même dans la librairie de son père. Son travail le plus connu consista à établir en 1820, une théorie de l'électromagnétisme, décrivant la façon dont un courant électrique pouvait générer un champ magnétique. Il a également construit le premier instrument capable de mesurer un flux électrique (appelé *galvanomètre*) et a découvert la fluorine.



Figure 1-41. André-Marie Ampère a découvert qu'un courant électrique parcourant un fil crée autour de lui un champ magnétique. Il a utilisé ce principe pour réaliser le premier appareil de mesure de ce qui fut ensuite appelé un ampérage.

Nettoyage et recyclage

Vous pouvez vous débarrasser de la pile que vous avez vidée en la court-circuitant. Il ne faut pas mettre les piles usagées à la poubelle car elles contiennent des métaux lourds qui doivent être maintenus hors de l'écosystème. Les communes prévoient des bornes pour le recyclage des déchets nocifs ; si ce n'est pas le cas, adressez-vous à la déchèterie la plus proche.

Le fusible grillé n'est plus utilisable, il peut être jeté.

La seconde pile, qui a été protégée par le fusible, devrait toujours fonctionner.

Le support de piles sera réutilisé dans une prochaine expérience.

Expérience 3 : votre premier circuit

Il est temps de faire quelque chose d'utile à partir de l'électricité. Pour ce faire, vous allez mener une expérience mettant en jeu des composants appelés résistances, ainsi qu'une LED.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V
- 3 résistances de valeurs respectives 470 Ω , 1K et 2,2K
- 1 LED générique
- 3 fils de test munis de pinces crocodiles
- 1 multimètre

Préparation

La résistance, dont la valeur s'exprime en ohms, est le principal composant d'un circuit électronique. Comme son nom l'indique, elle résiste au passage du courant électrique.

Il est facile de connaître la valeur des résistances et même si l'étiquette affiche clairement cette information, il est préférable de savoir la déterminer. Pour cela, vous avez deux possibilités :

- utiliser votre multimètre, après l'avoir réglé pour la mesure des résistances ;
- apprendre le code des couleurs qui sont imprimées sur la plupart des résistances.

Il est conseillé de les trier et de les ranger dans des petites boîtes en plastique ou des sachets étiquetés.

Fondamentaux : le code couleur des résistances

Sur certaines résistances, leur valeur est indiquée en tout petit : pour la lire, il faut utiliser une loupe (figure 1-42).

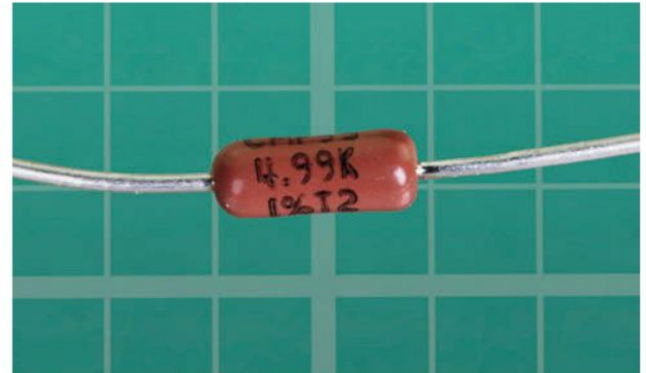


Figure 1-42. Résistance comportant une valeur imprimée.

Cependant, la plupart des résistances sont codées à l'aide d'anneaux colorés (figure 1-43).

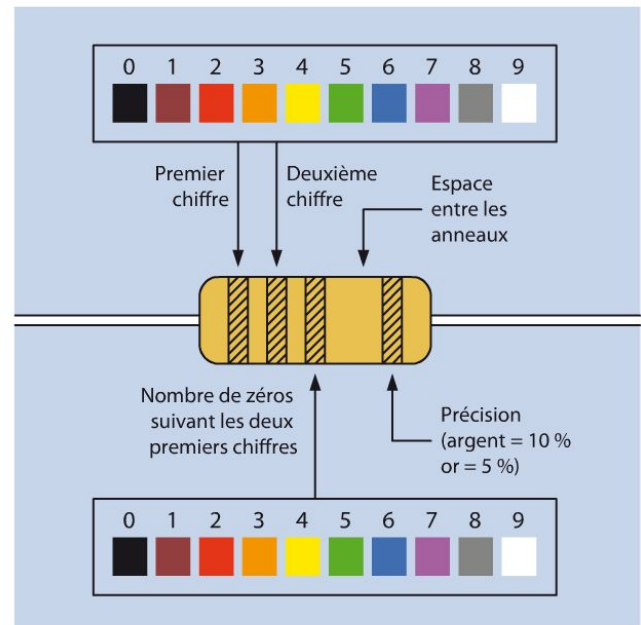


Figure 1-43. Codification indiquant la valeur d'une résistance.

La figure 1-44 montre quatre exemples.

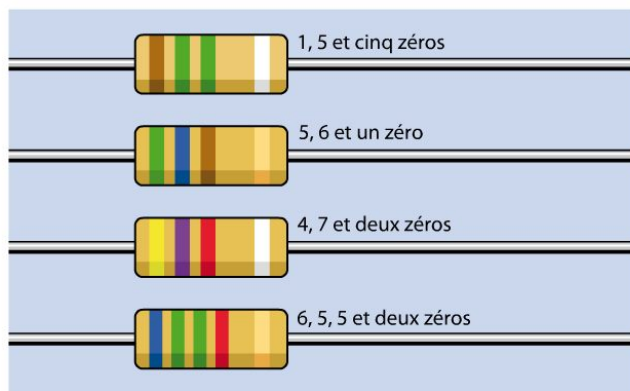


Figure 1-44. Les valeurs de ces résistances sont, du haut vers le bas : 1 500 000 Ω (1,5M) avec une tolérance de 10 %, 560 Ω à 5 %, 4 700 Ω (4,7K) à 10 % et 65 500 Ω (65,5K) à 5 %.

La codification peut se résumer ainsi :

- Ignorez la couleur du corps de la résistance (à l'exception des corps blancs qui peuvent signaler des résistances non inflammables ou protégées par un fusible et devant être remplacées par un composant de même type).
- Recherchez un anneau argent ou or. Si vous le trouvez, orientez la résistance afin que cet anneau se trouve à votre droite. L'argent signifie que la valeur de la résistance est précise à 10 % près, tandis qu'un anneau doré signifie une précision de 5 %. Ceci s'appelle la *tolérance* de la résistance.
- Si vous ne trouvez pas d'anneau doré ou argenté, orientez la résistance de façon à ce que les anneaux colorés se trouvent le plus à gauche du corps de la résistance. Il y en a habituellement trois
- Les couleurs des deux premiers anneaux, de gauche à droite, vous indiquent les deux premiers chiffres de la valeur de la résistance. La couleur du troisième anneau à partir de la gauche, indique combien de zéros suivent les deux premiers chiffres. Les valeurs des couleurs sont indiquées sur la figure 1-43.
- Dans le cas d'une résistance à quatre anneaux colorés : les trois premiers sont des chiffres et le quatrième anneau représente le nombre de zéros à ajouter à ces chiffres. Le troisième anneau de la valeur numérique permet à une résistance d'avoir une valeur intermédiaire.

Si ce n'est pas clair, vous pouvez toujours utiliser votre multimètre pour vérifier les valeurs. Toutefois, la valeur indiquée peut être légèrement différente de celle notée sur la résistance.

Allumer une LED

Observez maintenant une de vos LED génériques. Les anciennes ampoules à incandescence avaient pour défaut de consommer inutilement de l'énergie électrique en produisant de la chaleur. Les LED sont plus écologiques car elles convertissent en lumière la quasi-totalité de l'énergie qui leur est fournie et elles ont une durée de vie presque infinie – à condition de les utiliser correctement !

Une LED est sensible à la puissance qui lui est appliquée et à la façon de l'alimenter. Il convient de toujours respecter les règles suivantes :

- Le fil le plus long d'une LED doit recevoir une tension d'alimentation positive par rapport à son fil le plus court.
- La différence de tension appliquée entre le fil long et le fil court ne doit pas dépasser la limite précisée par le fabricant. Il s'agit de la *tension directe* (ou *forward voltage* dans les fiches techniques rédigées en anglais).
- L'intensité traversant une LED du fil long vers le fil court ne doit pas dépasser une limite fixée par le fabricant. Il s'agit de l'*intensité directe* (ou *forward current* en anglais).

Que se passerait-il si vous ne respectiez pas ces règles ? Vous le verrez dans l'expérience 4.

Assurez-vous d'avoir une pile de 9 V neuve. Vous pouvez utiliser un connecteur comme celui de la figure 1-8 ; il est cependant plus facile de relier directement une paire de fils de tests, comme sur la figure 1-45.

Prenez une résistance de 2,2K (2 200 Ω). Les anneaux colorés de votre résistance de 2,2K doivent être rouge-rouge-rouge, soit 2-2 et 00. Vous comprendrez pourquoi on choisit cette valeur en consultant la section « Historique : valeurs des résistances » page 20.

Vous avez également besoin d'une résistance de 1K (marron-noir-rouge) et d'une résistance de 470 Ω (jaune-violet-marron).

Reliez la résistance de 2,2K selon le circuit de la figure 1-45. Assurez-vous de relier la pile correctement, c'est-à-dire avec la borne positive à droite.

- Le symbole « plus » signifie toujours « pôle positif ».
- Le symbole « moins » signifie toujours « pôle négatif ».

Assurez-vous que le fil le plus long de la LED est à droite et faites attention qu'aucune des pinces crocodiles n'en touche une autre. Vous devriez voir la LED s'allumer modérément.

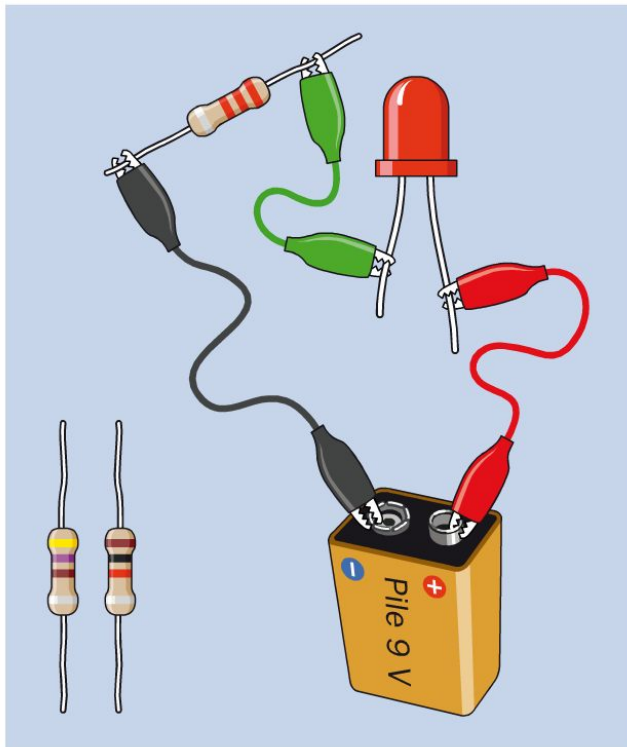


Figure 1-45. Votre premier circuit, permettant l'allumage d'une LED.

Remplacez la résistance de 2,2K par celle de 1K. La LED devrait briller plus intensément.

Remplacez ensuite la résistance de 1K par celle de 470 Ω ; la LED brille encore plus intensément.

Cela peut vous paraître évident, mais il s'agit d'une notion importante : la résistance bloque une partie du courant dans le circuit. Plus sa valeur est élevée, plus elle bloque le courant et moins elle en laisse pour la LED.

Vérification d'une résistance

Il est très facile d'utiliser votre multimètre pour vérifier la valeur d'une résistance. La figure 1-46 vous aidera à comprendre la procédure. Tout d'abord, n'oubliez pas de régler votre multimètre pour la mesure des résistances (Ω). Déconnectez la résistance de tout autre composant, puis reliez-la aux pointes de mesure de votre multimètre. Si vous avez un appareil manuel, réglez-le pour la mesure d'une valeur de résistance plus élevée que celle que vous pensez mesurer, sans quoi vous pourriez obtenir l'affichage d'une erreur.

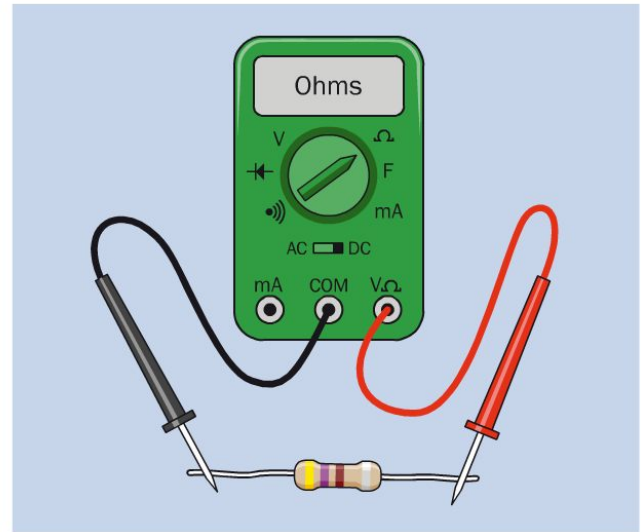


Figure 1-46. Mesure de la valeur d'une résistance.

Rappelons une chose importante : vous obtiendrez une mesure plus précise si vous appuyez fermement les pointes de touche sur les fils de la résistance. Ne maintenez pas les pointes et la résistance entre vos doigts, car cela mesurerait la résistance de votre corps en même temps que celle de votre résistance. Placez la résistance sur une surface plane et isolante, comme le plateau d'un bureau non métallique. Tenez les pointes de mesure par leurs parties plastifiées et appuyez-les sur les fils de votre résistance.

Vous pouvez procéder différemment en utilisant deux fils de test que vous relierez d'un côté à chacun des fils de la résistance et de l'autre aux cordons de mesure de votre multimètre. Vous garderez ainsi les mains libres pour mesurer vos résistances.

Historique : valeurs des résistances

Après avoir mesuré quelques résistances, vous noterez que les mêmes chiffres reviennent régulièrement. En milliers d'ohms, on rencontre fréquemment 1,0K, 1,5K, 2,2K, 3,3K, 4,7K et 6,8K. En dizaines de milliers, on trouve 10K, 15K, 22K, 33K, 47K et 68K.

Ces couples de chiffres sont appelés multiples car on les multiplie par 1, 10, 100, 1 000, 10 000 ou 100 000 pour obtenir les valeurs de base des résistances en ohms.

Une raison logique explique ce choix. Il y a longtemps, les résistances avaient une marge de précision de plus ou moins 20 %. Par exemple, une résistance de 1,0K pouvait avoir une valeur réelle de $1,0 + 20\% = 1,2K$ ou une résistance de 1,5K pouvait avoir une valeur plus faible de $1,5 - 20\% = 1,2K$. C'est pourquoi les résistances de valeur intermédiaire, entre 1,0K et 1,5K, n'existaient pas. De même, une résistance de 68 Ω pouvait atteindre $68 + 20\% = 80 \Omega$, alors qu'une résistance de 100 Ω pouvait ne pas dépasser $100 - 20\% = 80 \Omega$; il était donc inutile de prévoir des valeurs entre 68 et 100 Ω .

Dans le tableau de la figure 1-47, les valeurs en blanc sont les valeurs multiples choisies à l'origine et toujours largement utilisées. De nos jours, les résistances sont précises à plus ou moins 10 %, voire moins.

Si vous ajoutez les valeurs en noir, vous obtenez toutes les valeurs possibles de résistances de précision 10 %. Si vous ajoutez les valeurs en bleu, vous obtenez toutes les valeurs disponibles pour des résistances de précision 5 %.

1,00	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Figure 1-47. Valeurs multiples traditionnelles des résistances et condensateurs.

Dans cet ouvrage ne sont utilisées que les six valeurs multiples d'origine. Lorsque l'expérience demande de la précision – dans l'expérience 19, par exemple, où un circuit mesure la rapidité de vos réflexes –, vous pouvez utiliser un potentiomètre pour ajuster la sortie plus finement.

Nettoyage et recyclage

Conservez la pile et la LED pour la prochaine expérience. Les résistances pourront également être réutilisées par la suite.

Expérience 4 : une résistance variable

Il est possible de faire varier la résistance dans un circuit en y insérant un potentiomètre, qui va contrôler l'intensité. En réalisant cette expérience, vous allez enrichir vos connaissances sur les tensions, les intensités et leur relation. Vous apprendrez également comment lire la fiche technique d'un fabricant.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V
- 1 résistance de 470 Ω et 1 résistance de 1K
- 2 LED génériques
- 4 fils de test avec des pinces crocodiles à chaque extrémité
- 2 potentiomètres de 1K à variation linéaire
- 1 multimètre

À l'intérieur du potentiomètre

Commencez par observer comment fonctionne un potentiomètre. La meilleure façon d'y parvenir est de l'ouvrir. Prévoyez un second appareil dans le cas où vous ne réussiriez pas à réassembler le premier.

Certains lecteurs de la première édition de ce livre se sont plaints qu'il y ait un risque d'endommager le potentiomètre en essayant de l'ouvrir. Mais presque tout apprentissage nécessite de consommer certaines ressources comme des crayons et du papier ou des marqueurs. Si vous ne voulez pas prendre ce risque, vous pouvez vous contenter d'étudier les photos qui suivent.

La plupart des potentiomètres sont assemblés par des petites languettes métalliques (figure 1-48). Vous devez les déplier vers le haut (figure 1-49), en glissant dessous la lame d'un couteau, pour faire levier ou à l'aide de pinces.



Figure 1-48. Languettes maintenant le potentiomètre assemblé.



Figure 1-49. Les languettes sont dépliées vers l'extérieur.

Après avoir déplié les languettes, maintenez le corps du potentiomètre entre vos doigts et tirez délicatement son axe vers le haut avec l'autre main. Il devrait s'ouvrir comme sur la figure 1-50.



Figure 1-50. Curseur du potentiomètre.

À l'intérieur de sa coque, vous trouvez une piste circulaire. Selon le modèle dont vous disposez, la piste est constituée soit d'un plastique conducteur, soit d'un fil très mince. Le fil ou le plastique possèdent une certaine résistance (un total de $1\,000\ \Omega$ dans un potentiomètre de 1K) et, lorsque vous tournez l'axe, un curseur (ici, cerclé de rouge sur la figure 1-50) entre en contact avec la piste en reliant un point quelconque à la borne du milieu.

Vous pouvez maintenant réassembler votre dispositif. En cas de problème, utilisez votre potentiomètre de secours.

Test du potentiomètre

Réglez votre multimètre pour la mesure des résistances (au moins 1K avec un multimètre à réglage manuel). Puis appliquez les pointes de mesure sur deux bornes adjacentes du potentiomètre, comme sur la figure 1-51. Vous devriez constater qu'en tournant l'axe du potentiomètre dans le sens des aiguilles d'une montre (vu du dessus), la résistance diminue jusqu'à une valeur proche de zéro. En tournant l'axe dans le sens contraire, la résistance augmente jusqu'à environ 1K. Laissez maintenant la pointe noire à la même place et reliez la pointe de touche rouge à la borne opposée. Le comportement du potentiomètre doit s'inverser.

Pensez-vous vraisemblable que la borne du milieu soit reliée au curseur à l'intérieur du potentiomètre ? Pensez-vous que les deux autres bornes soient reliées aux extrémités de la piste ?

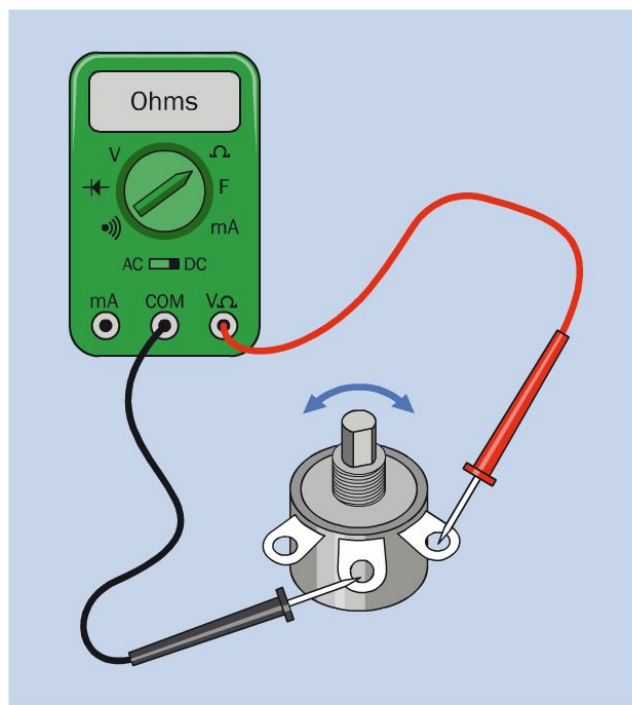


Figure 1-51. Procédure de vérification du comportement d'un potentiomètre.

Si vous inversez les pointes rouge et noire, la résistance ne change pas ; elle est la même dans les deux sens. Contrairement à une LED, qui doit être connectée en respectant un sens, un potentiomètre n'a pas de *polarité*.

Attention : n'alimentez pas le circuit

N'alimentez pas votre circuit lorsque vous mesurez une résistance. Il ne doit pas y avoir de conflit entre la pile du multimètre et celle de la pile qui alimente le circuit.

Variations de luminosité de votre LED



Attention à cette expérience !

J'ai réalisé cette expérience de nombreuses fois sans rencontrer de problème, mais un lecteur m'a informé que sa LED avait explosé. Si vous voulez être prudent, utilisez des lunettes de protection : une paire de lunettes ordinaires fera l'affaire.

Vous pouvez maintenant utiliser votre potentiomètre pour modifier la brillance de votre LED. Connectez-le tout comme sur la figure 1-52. Assurez-vous que les deux pinces crocodiles sont bien reliées aux bornes indiquées. Le potentiomètre agit ici comme une résistance variable, il remplace la résistance à valeur fixe de l'expérience 3 (figure 1-45).

Positionnez d'abord l'axe du potentiomètre au maximum dans le *sens inverse des aiguilles d'une montre* (vu du dessus). Dans le cas contraire, la LED serait immédiatement grillée. Puis tournez lentement l'axe dans le sens des aiguilles d'une montre. Vous constaterez que la LED s'illumine de plus en plus intensément jusqu'au moment où elle s'éteint.

Cette LED ne brillera plus jamais maintenant (je suis désolé), vous pouvez la jeter.

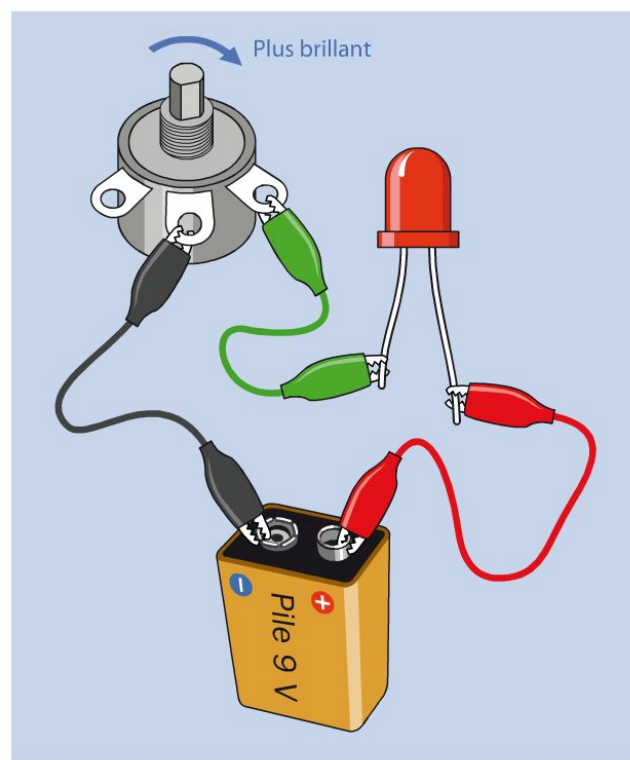


Figure 1-52. Réglage de la luminosité d'une LED à l'aide d'un potentiomètre.

Remplacez votre LED et, cette fois, protégez-la : ajoutez une résistance de $470\ \Omega$ (figure 1-53). Le courant électrique circule maintenant au travers de la résistance et du potentiomètre ; ainsi, la LED sera protégée, même si la résistance du potentiomètre tend à diminuer. Vous pouvez désormais tourner l'axe du potentiomètre, sans craindre de détruire la LED.

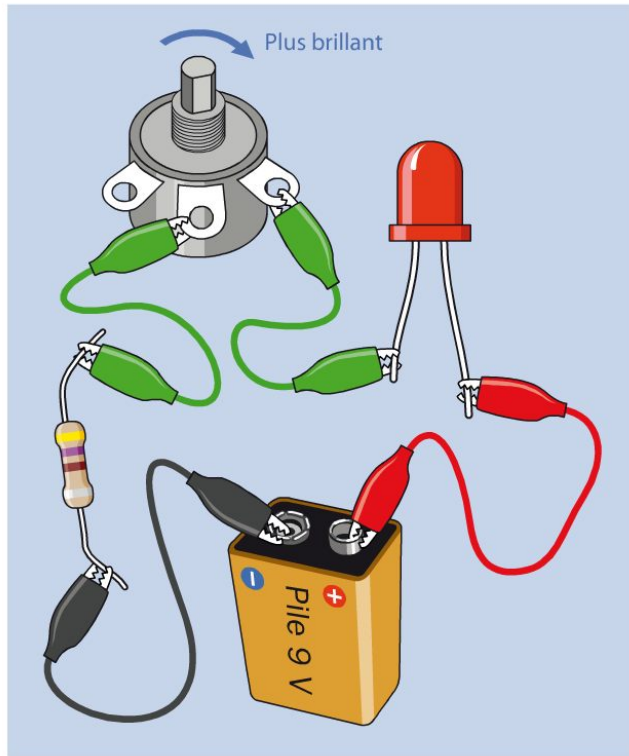


Figure 1-53. Protection de la LED.

Cette expérience vous a appris qu'une LED est trop fragile pour être reliée directement à une pile de 9 V. Elle doit toujours être protégée par une résistance placée en amont.

Pourriez-vous alimenter une LED en la reliant directement à une pile de 1,5 V ? Essayez, vous obtiendrez peut-être une faible illumination de la LED. Cependant, 1,5 V est une valeur inférieure au seuil d'allumage de la LED. Essayons de déterminer la tension dont une LED a besoin pour s'allumer.

Mesure d'une différence de potentiel

La pile étant reliée au circuit, sélectionnez la mesure des tensions continues (DC) sur votre multimètre. Vous utiliserez le même connecteur pour la mesure des tensions que celui que vous avez utilisé pour la mesure des résistances.

Si votre multimètre est à réglage de gamme manuel, choisissez la mesure d'une tension jusqu'à 9 V. Rappelez-vous, les nombres inscrits autour du bouton du multimètre représentent la valeur de mesure maximale de chaque gamme.

Reliez maintenant les pointes de mesure aux bornes du potentiomètre qui sont utilisées (figure 1-54). Essayez de maintenir les pointes en place pendant que vous tournez légèrement l'axe du potentiomètre dans un sens, puis dans l'autre. Vous devriez voir la tension mesurée varier conjointement. C'est ce qu'on appelle une *différence de potentiel*, qui n'est rien d'autre qu'une tension entre deux points.

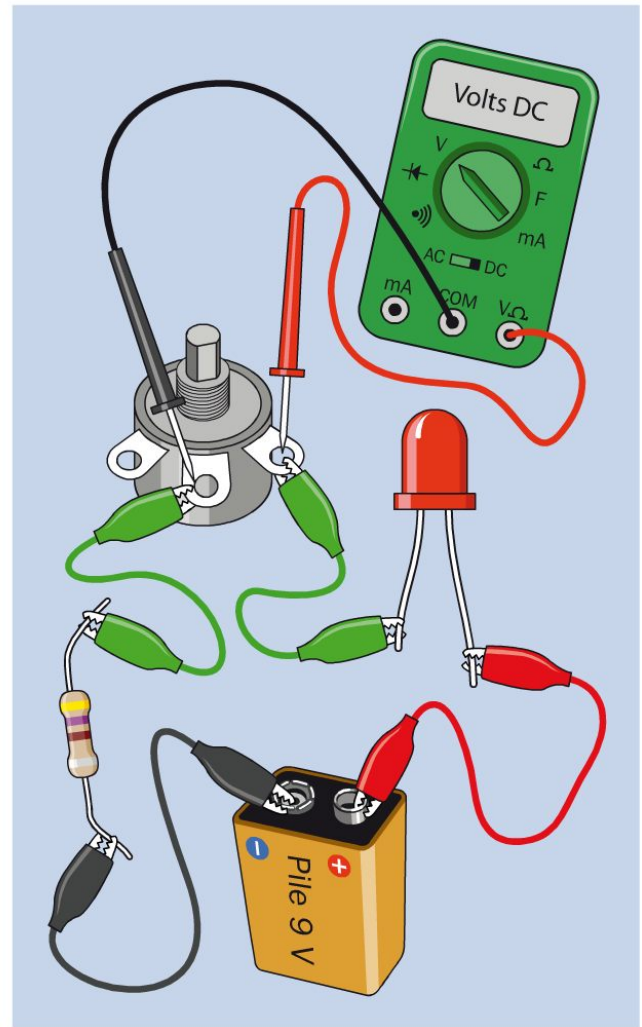


Figure 1-54. Mesure d'une différence de potentiel.

Si vous mesurez la différence de potentiel aux bornes de la LED, elle variera également selon la position de l'axe du potentiomètre, mais pas autant que ce que vous pourriez penser. En effet, une LED s'ajuste dans certaines proportions, en adaptant sa résistance aux variations de tension et d'intensité.

Que se passe-t-il si vous inversez les pointes rouge et noire ? Un signe moins devrait apparaître sur l'écran de votre multimètre. Vous n'endommagerez pas votre appareil, mais vous commettrez moins d'erreurs d'interprétation en plaçant toujours la pointe rouge sur un point positif.

Pour terminer, placez les pointes de touche sur la résistance fixe. À nouveau, la différence de potentiel va varier selon la position de l'axe du potentiomètre. La tension de la pile se partage entre les différents composants de ce circuit très simple. Lorsque le potentiomètre réduit la part qui lui revient, une différence de tension plus importante est disponible aux bornes de la résistance fixe et pour la LED. De plus, quand le potentiomètre a une résistance plus faible, la résistance totale du circuit est moindre, permettant donc le passage d'une plus forte intensité.

Voici quelques notions à retenir :

- Si vous ajoutez les différences de potentiel des différents composants du circuit, leur somme totale sera identique à la tension de la pile.
- La mesure d'une tension se fait *relativement* entre deux points d'un circuit. Cela correspond à leur différence de potentiel.
- Vous utilisez votre multimètre comme un stéthoscope, sans perturber ou interrompre les liaisons du circuit.

Contrôle du courant

Vous allez maintenant procéder à différentes mesures. Vérifiez l'intensité dans le circuit, en utilisant votre multimètre pour la mesure des milliampères (pas des volts). Vous devez respecter les règles suivantes :

- vous ne pouvez mesurer le courant (ampérage) que lorsqu'il passe à travers votre multimètre. Vous devez donc insérer votre multimètre dans le circuit ;
- une intensité trop élevée détruira le fusible interne de votre multimètre ;
- vous devez utiliser le connecteur du multimètre marqué mA. Le même que celui que vous avez utilisé jusqu'à présent, ou un autre.

Attention : surcharge du multimètre

Soyez prudent lors de la mesure des intensités. Par exemple, si vous reliez les pointes de mesure de votre multimètre directement aux bornes d'une pile alors que celui-ci est réglé pour la mesure des intensités en mA,

vous provoquerez instantanément une surcharge et le fusible interne de votre multimètre sera grillé. Un multimètre bon marché ne sera peut-être pas équipé d'un fusible de rechange et vous serez obligé d'ouvrir le boîtier pour vérifier ses caractéristiques et le remplacer.

- Mesurez toujours les intensités aux endroits du circuit où sont placés les composants qui limitent le courant.
- Si le connecteur de votre multimètre est séparé, ne reliez le cordon de mesure rouge qu'au moment d'effectuer la mesure. Remplacez-le ensuite sur la borne volts/ohms du multimètre.

Mesure de l'intensité

Insérez le multimètre entre la LED et le potentiomètre (figure 1-55).

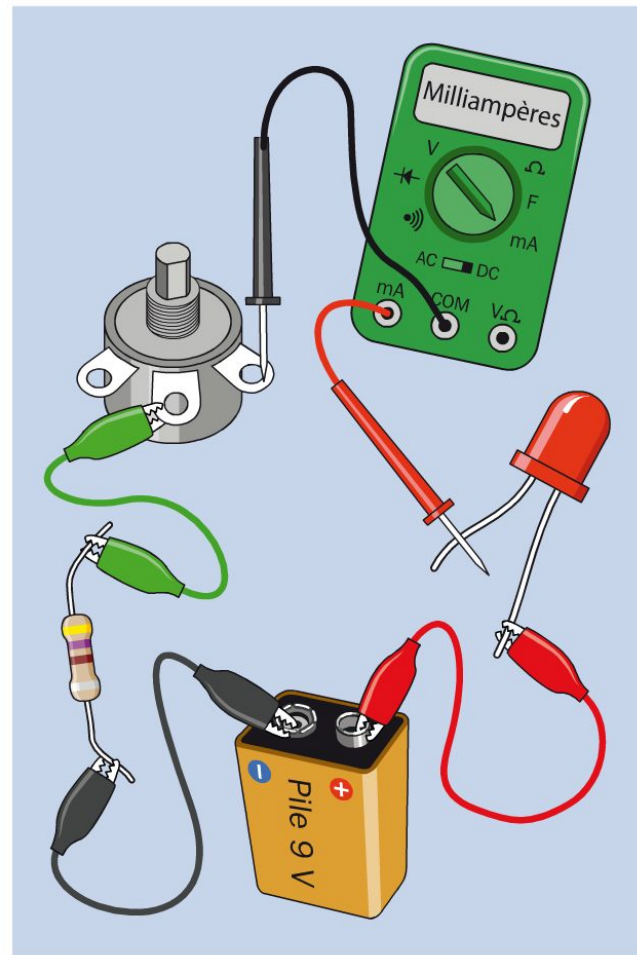


Figure 1-55. Le courant traverse le multimètre avant de passer dans le circuit.

En tournant légèrement l'axe du potentiomètre dans les deux sens, vous devriez constater que la variation de la résistance du circuit provoque un changement de l'intensité du courant – l'*ampérage*. Dans la précédente expérience, la LED a été endommagée parce qu'une intensité trop importante l'avait fait surchauffer, provoquant sa fusion interne, comme dans un fusible. Plus la résistance est élevée, plus elle limite l'intensité.

Passons maintenant à un test intéressant. Tournez le potentiomètre au maximum dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Notez l'intensité mesurée. Sans modifier le potentiomètre, déplacez ensuite le multimètre en l'insérant entre la pile et la LED (figure 1-56).

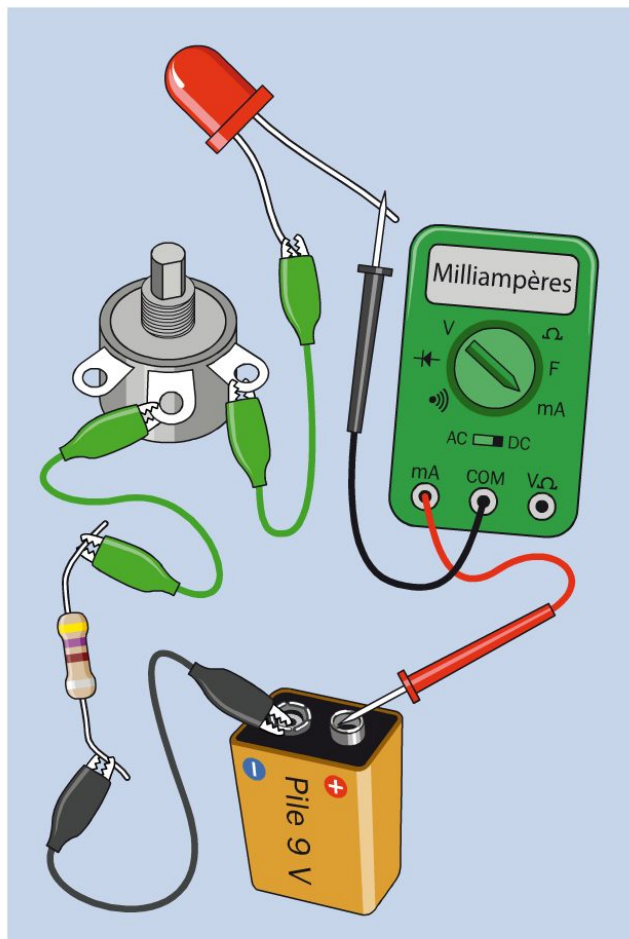


Figure 1-56. Le courant traversant un circuit simple est le même, quel que soit l'endroit de la mesure.

La valeur du courant devrait être la même que précédemment – ou très proche, à cause de la faible variation possible de la résistance du potentiomètre résultant du déplacement des pinces crocodiles.

Le courant est le même en tout point d'un circuit simple. C'est ainsi car le flux électrique ne peut prendre aucun autre chemin.

Relevé des mesures

Vous allez maintenant faire le relevé de ces mesures, afin de mettre en évidence la règle la plus fondamentale en électronique.

Retirez la LED du circuit et connectez votre multimètre directement entre la pile et le potentiomètre. Remplacez la résistance de $470\ \Omega$ par une résistance de 1K . La résistance interne du potentiomètre est si faible qu'elle est négligeable, de même que celles des pinces crocodiles et des fils.

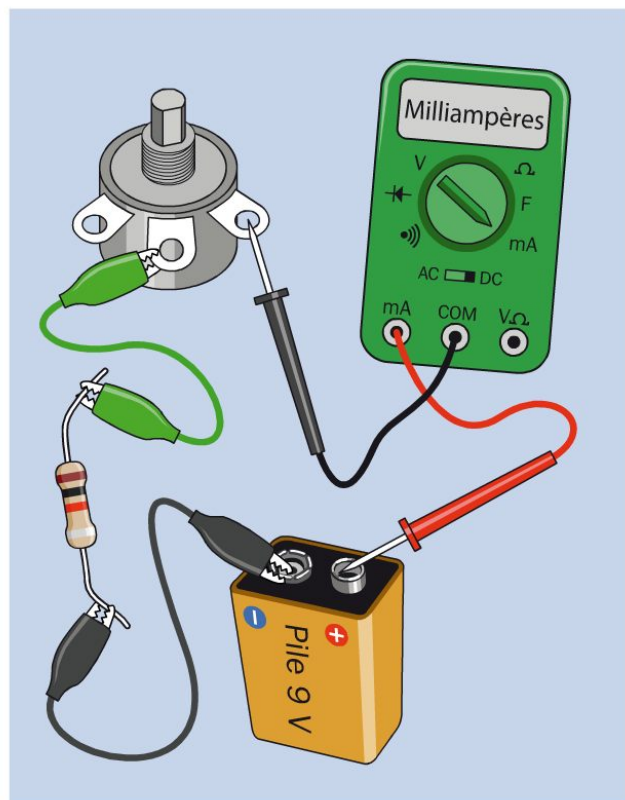


Figure 1-57. Dans ce test final, la LED est retirée du circuit.

Tournez le potentiomètre au maximum dans le sens des aiguilles d'une montre, de sorte qu'il présente une résistance presque égale à zéro. Vous n'avez donc qu'une résistance de $1\ 000\ \Omega$ dans le circuit. Quelle valeur de courant votre multimètre mesure-t-il ?

Tournez le potentiomètre à mi-course, afin qu'il présente une résistance d'environ 500 Ω . La résistance totale du circuit est maintenant d'environ 1 500 Ω . Quel courant indique maintenant votre multimètre ?

Tournez le potentiomètre à fond dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, afin que sa valeur totale soit insérée dans le circuit en plus de la résistance, ce qui représente 2 000 Ω au total. Quelle est l'intensité maintenant ?

En réalisant cette expérience, voici les valeurs que j'ai obtenues. Les vôtres devraient être à peu près identiques :

- 9 mA avec une résistance totale de 1K
- 6 mA avec une résistance totale de 1,5K
- 4,5 mA avec une résistance totale de 2K

Remarquez-vous quelque chose d'intéressant ? Sur chaque ligne, si vous multipliez le nombre de gauche par celui de droite, le résultat est toujours 9. Et 9 V, c'est justement la tension de la pile.

Nous ne disposons que de trois mesures mais, si vous faites un test plus détaillé en utilisant des résistances à valeurs fixes, aucun doute que les résultats seront identiques. Cela peut se résumer ainsi :

Tension de la pile en V = intensité en mA $\times$ résistance en K
1K, c'est 1 000 Ω et 1 mA, c'est 1/1 000 d'ampère. En utilisant les unités fondamentales, volts et ampères, notre formule devient :

$$\text{Tension en V} = (\text{ampères} / 1\,000) \times (\text{ohms} \times 1\,000)$$

Les deux coefficients 1 000 s'annulent ; nous obtenons alors :

$$\text{Volts} = \text{ampères} \times \text{ohms}$$

Cette formule est connue sous le nom de *loi d'ohm*. Elle est absolument fondamentale.

Fondamentaux : la loi d'Ohm

La façon générale d'exprimer la loi d'Ohm est :

$$\text{Tension} = \text{intensité} \times \text{résistance} \text{ soit } V = I \times R$$

En déplaçant les termes, on obtient deux autres versions de la formule :

$$I = V / R$$

$$R = V / I$$

Pour utiliser cette formule, veillez à conserver une cohérence entre les unités. Si V est en volts et I en ampères, R sera en ohms.

Pour vous aider à mémoriser la loi d'Ohm vous pouvez retenir les unités :

$$\text{Volts} = \text{ampères} \times \text{ohms}$$

$$\text{Ampères} = \text{volts} / \text{ohms}$$

$$\text{Ohms} = \text{volts} / \text{ampères}$$

Souvenez-vous, les volts représentent une différence de tension entre deux points d'un circuit simple. Les ohms représentent la résistance entre les deux mêmes points. Les ampères représentent l'intensité qui traverse le circuit.

Fondamentaux : montages en série et en parallèle

Dans votre circuit de test, la résistance et le potentiomètre ont été reliés en *série*, ce qui signifie que le courant électrique traverse d'abord la première et ensuite le second. Une autre possibilité aurait été de les placer côte à côte, en *parallèle*.

- Des résistances en série sont reliées en se suivant l'une après l'autre.
- Des résistances en parallèle sont placées côte à côte.

Lorsque vous reliez en série deux résistances de même valeur, elles s'additionnent, ainsi vous doublez la résistance totale, car l'électricité doit franchir ces deux barrières l'une après l'autre (figure 1-58).

Si vous montez deux résistances en parallèle, vous divisez la résistance totale par deux, car vous offrez à l'électricité deux chemins d'égale résistance au lieu d'un seul (figure 1-59).

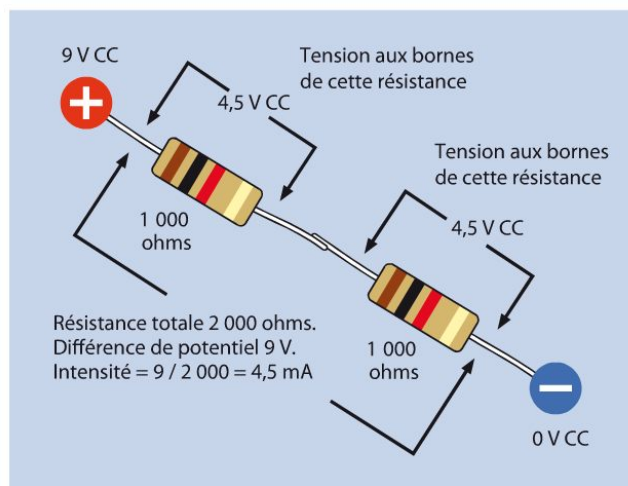


Figure 1-58. Deux résistances de même valeur en série.

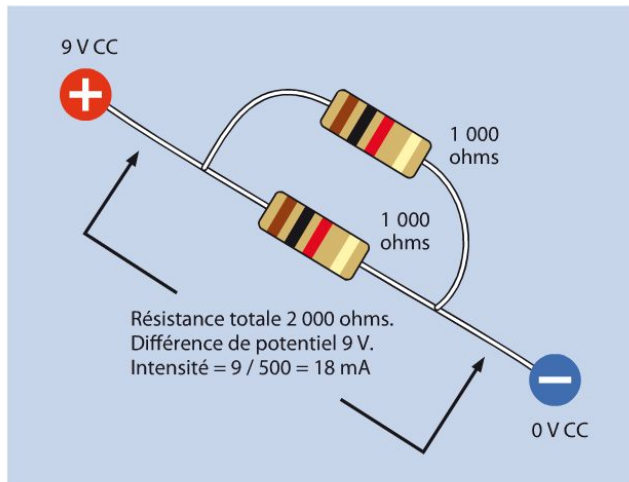


Figure 1-59. Deux résistances de même valeur en parallèle.

Dans les deux illustrations, l'intensité en milliampères a été calculée à l'aide de la loi d'Ohm.

En pratique, les résistances sont rarement montées en parallèle, contrairement à d'autres types de composants tels que les ampoules domestiques. Il est donc utile de savoir que la résistance d'un circuit diminue, lorsqu'on monte des composants en parallèle. Plus vous augmentez le nombre de chemins que le flux peut emprunter, plus le courant total augmente.

Utilisation de la loi d'Ohm

La loi d'Ohm est extrêmement utile. Par exemple, elle sert à déterminer avec précision la résistance à mettre dans un circuit en série pour protéger efficacement une LED, tout en générant la luminosité maximale autorisée.

La première étape consiste à trouver les spécifications de la LED, fournies par son fabricant. Cette information se trouve dans la fiche technique de la LED que l'on trouve en ligne.

Supposons que vous ayez une LED fabriquée par Vishay Semiconductors. Vous connaissez sa référence, qui est par exemple TLHR5400, puisqu'elle est normalement indiquée sur sa boîte d'origine. Naturellement, vous avez gardé cette boîte pour pouvoir y ranger la LED (en tout cas, c'est ce que vous auriez du faire).

Pour trouver la fiche technique (*datasheet* en anglais) de cette LED, il vous suffit d'effectuer une recherche sur Google en indiquant la référence et le fabricant. En consultant cette fiche, vous trouverez les informations dont vous avez besoin. Sur l'exemple de la figure 1-60, la

LED devrait normalement être alimentée par une différence de potentiel de 2 V (3 V au maximum)

Mais que veut dire « at If (mA) » ? Rappelez-vous, la lettre I est utilisée pour représenter le courant qui traverse un circuit. La lettre F signifie dans le sens direct (*forward* en anglais) de la diode. Ainsi, la tension dans le sens direct est prévue pour un courant direct de 20 mA, qui est donc la valeur recommandée pour cette LED.

PRODUCT GROUP AND PACKAGE DA*									
- Product group: LED - Package: 5 mm - Product series: standard - Angle of half intensity: $\pm 30^\circ$									
PARTS TABLE									
PART	COLOR	LUMINO MIN	If (mA)	FORWARD VOLTAGE (V)			at If (mA)	TEC	
				MIN.	TYP.	MAX.			
TLHR5400	Red	1.7	10	-	2	3	20	GaA	
TLHR5400-AS12Z	Red		10	-	2	3	20	GaA	
TLHR5401	Red		25	10	-	2	3	20	GaA
TLHR5405	Red	325	10	-	2	3	20	GaA	
TLHR5405-AS12Z	Red	625	10	-	2	3	20	GaA	

Figure 1-60. Fiche technique d'une LED.

Nous savons donc que cette LED fonctionne correctement avec 2 V et 20 mA ; la loi d'Ohm va vous donner le reste.

Quelle valeur de résistance choisir ?

Dans le circuit de la figure 1-61, vous désirez connaître la valeur correcte de la résistance. Commencez par vous remémorer la règle : si vous ajoutez les différences de potentiel aux bornes de tous les composants de ce circuit, le total sera la tension de la pile.

La tension de la pile est de 9 V et nous souhaitons délivrer 2 V à la LED. Il faut donc que la résistance fasse chuter la tension de 7 V.

Pour l'intensité, rappelez-vous une autre règle déjà mentionnée : le courant, dans un circuit simple, est le même en tout point de ce circuit.

Ainsi, le courant qui traverse la résistance sera le même que celui qui traverse la LED. Sa valeur doit être de 20 mA. Attention, la loi d'Ohm exige que vos unités soient en accord les unes avec les autres. Si vous utilisez des volts et des ohms, vous devez exprimer le courant en ampères, soit ici 0,02 A.

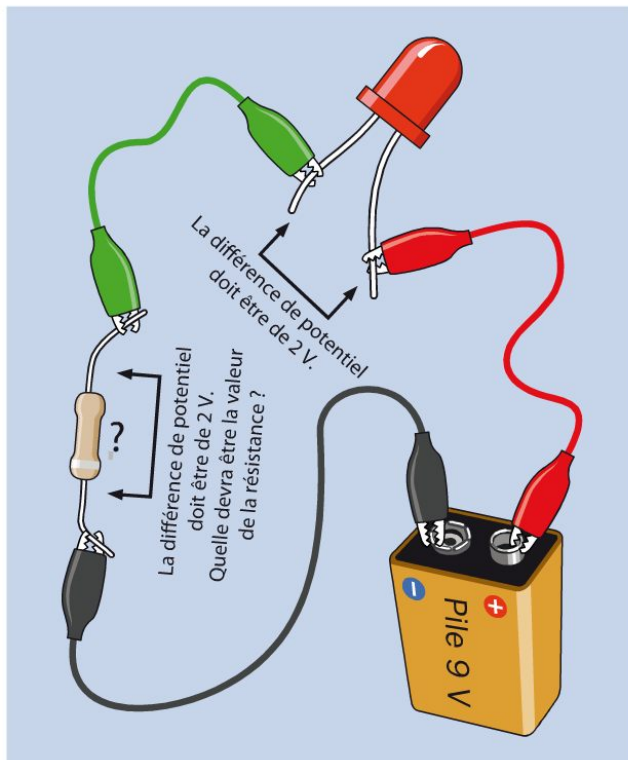


Figure 1-61. Ce circuit simple vous permet de calculer la valeur de la résistance.

Notez à présent ce que vous savez, c'est toujours par là qu'il faut commencer :

$$V = 7 \text{ V}$$

$$I = 0,02 \text{ A}$$

La version de la loi d'Ohm à utiliser est la suivante :

$$R = V / I$$

Cela donne $7/0,02 = 350 \Omega$. Ce n'est pas une valeur standard pour une résistance, mais 330Ω en est une. Si vous utilisez une LED plus sensible, vous pouvez aussi choisir la valeur standard immédiatement supérieure qui est 470Ω . Rappelez-vous, j'ai utilisé une résistance de 470Ω dans l'expérience 3. Vous savez maintenant pourquoi : j'avais fait le calcul.

Une erreur fréquente est de diviser une tension par une intensité pour trouver la valeur d'une résistance, en prenant pour référence la tension d'alimentation – 9 V dans notre cas. Ceci est incorrect, car la tension d'alimentation est appliquée à la résistance ET à la LED. Pour trouver la valeur de la résistance, vous ne devez considérer que la différence de potentiel à ses bornes, qui est 7 V.

Que se passe-t-il avec une tension d'alimentation différente ? Plus loin dans ce livre, vous utiliserez une alimentation de 5 V dans plusieurs expériences. La LED utilisera toujours 2 V. La résistance devra donc faire chuter la tension de 3 V. L'intensité demeurant identique, le calcul est le suivant :

$$R = 3 / 0,02$$

La valeur de la résistance est de 150Ω . Toutefois, si vous n'avez pas besoin que votre LED délivre sa luminosité maximale, vous pouvez en choisir une ayant une intensité plus faible que 20 mA. De même, si une pile alimente le circuit, vous pourriez souhaiter diminuer la puissance consommée afin de prolonger la durée de la pile. En prenant ceci en compte, vous pourriez utiliser la prochaine valeur standard supérieure pour la résistance qui serait de 220Ω .

Historique : les fils chauffants

J'ai dit précédemment que les fils de connexion avaient une résistance très faible. Est-ce une valeur si faible qu'elle peut toujours être ignorée ? En fait, non. Si un courant important traverse un fil, celui-ci chauffera, comme vous l'avez constaté en court-circuitant la pile de 1,5 V dans l'expérience 2. Et si le fil chauffe, vous pouvez être sûr qu'il bloque une certaine tension, offrant ainsi une tension plus faible aux composants qui lui sont reliés.

À nouveau, vous pouvez utiliser la loi d'Ohm pour chiffrer cela.

Supposez que vous ayez un fil très long qui présente une résistance de valeur $0,2 \Omega$. Vous voulez délivrer une intensité de 15 A à un composant qui lui est relié.

Commencez par écrire ce que vous savez :

$$R = 0,2 \text{ (résistance du fil)}$$

$$I = 15 \text{ (intensité traversant le circuit)}$$

Vous devez maintenant déterminer la chute de tension entre les extrémités du fil. Vous devez donc utiliser la version de la loi d'Ohm dont la tension est à gauche du signe égal :

$$V = I \times R$$

Remplacez maintenant par vos valeurs :

$$V = 15 \times 0,2 = 3 \text{ volts}$$

3 V, c'est peu si vous utilisez une alimentation à tension élevée. En revanche, si vous utilisez une batterie d'automobile de 12 V, cette longueur de fil absorbera un quart de la tension disponible.

Cela explique pourquoi les fils utilisés dans les voitures sont relativement gros : afin de gaspiller le moins possible la tension de la batterie.

Fondamentaux : les nombres décimaux

Le célèbre homme politique anglais, Sir Winston Churchill, était réputé pour se plaindre de « ces maudites virgules ». Il parlait des virgules des nombres décimaux. Winston Churchill était alors ministre des Finances et responsable des dépenses de son gouvernement, sa difficulté avec les nombres décimaux était un réel problème.

Division

Pour diviser des nombres décimaux, vous pouvez simplifier l'opération en déplaçant la virgule du numérateur (en haut de la division) et du dénominateur (en bas de la division) du même nombre de positions.

Par exemple, pour déterminer la valeur de la résistance à mettre en série avec la LED : vous voulez diviser 7 par 0,02.

Déplacez la virgule de deux positions à droite :

$$7 / 0,02 = 700 / 2$$

Si vous devez déplacer la virgule au-delà d'un chiffre, vous ajoutez un zéro pour chaque déplacement. C'est ainsi beaucoup plus simple.

Le résultat est 350.

Multiplication

Multiplions par exemple 0,03 par 0,002. Puisque vous multipliez, les virgules se déplacent en sens opposés :

$$0,03 \times 0,002 = 3 \times 0,00002$$

La réponse est donc 0,00006.

Théorie : des calculs sur le bout de la langue

Revenons à la question posée dans l'expérience précédente : pourquoi votre langue ne brûle-t-elle pas ?

Maintenant que vous connaissez la loi d'Ohm, vous pouvez répondre à cette question à l'aide des nombres. Supposons que la pile délivre sa tension nominale de 9 V et que votre langue ait une résistance de 50K, c'est-à-dire 50 000 Ω . Comme toujours, commençons par écrire ce que nous connaissons :

$$V = 9$$

$$R = 50\,000$$

Vous devez maintenant calculer le courant I :

$$I = V / R$$

Remplaçons les lettres par leurs valeurs :

$$I = 9 / 50\,000 = 0,00018 \text{ ampères}$$

Déplacez la virgule de trois positions afin de convertir les ampères en milliampères :

$$I = 0,18 \text{ mA}$$

C'est une intensité très faible. Elle ne provoquera pas beaucoup de chaleur.

Qu'en était-il lorsque vous avez court-circuité la pile ? Quelle intensité a provoqué l'échauffement des fils ? Supposons que la résistance des fils soit de 1 Ω . Vous pouvez alors noter :

$$V = 1,5$$

$$R = 0,1$$

Comme c'est l'intensité que vous voulez connaître, notez :

$$I = V / R$$

$$\text{soit } I = 1,5 / 0,1 = 15 \text{ ampères}$$

C'est presque 1 000 000 de fois supérieur à l'intensité qui traversait votre langue, ce qui explique l'important dégagement de chaleur dans le fil très fin.

Un outil électrique puissant, comme un radiateur par exemple, peut absorber 15 A. Vous vous demandez peut-être si la petite pile AA pouvait délivrer autant de courant. La réponse est... que je n'en suis pas sûr. Je ne peux pas le mesurer avec mon multimètre, car 15 A provoquerait la fusion de son fusible de protection, même si je relie le cordon de mesure dans le connecteur marqué 10 A. J'ai refait l'expérience en utilisant un fusible de 10 A au lieu du fusible de 3 A et il a résisté.

Comment pouvons-nous expliquer qu'il ait résisté ? La loi d'Ohm indique que le courant devrait être de 15 A, mais, pour une raison inconnue, il était inférieur. Peut-être la résistance des fils du support de la pile était-elle

supérieure à 0,1 Ω ? Je pense au contraire qu'elle devait être inférieure. Alors, qu'est-ce qui a bien pu réduire l'intensité prévue par la loi d'Ohm ?

La réponse tient au fait que, dans la réalité, chaque élément électrique comporte une résistance, même une pile. Rappelez-vous qu'une pile est un composant actif d'un circuit.

Lorsque j'ai court-circuité la pile, elle s'est échauffée, tout comme les fils. Elle possède donc bien une *résistance interne*. Vous pouvez l'ignorer quand vous manipulez des circuits consommant une faible intensité, en milliam-pères ; en revanche, pour des intensités plus importantes, la pile intervient activement.

C'est pour cela qu'il ne faut pas utiliser une plus grosse source d'alimentation (en particulier une batterie d'auto-mobile). Les piles ou batteries plus grosses ont une résistance interne plus faible, ainsi elles délivrent un courant beaucoup plus important et elles génèrent une quantité de chaleur susceptible de les faire exploser. La batterie d'une voiture est capable de fournir une intensité de plusieurs centaines d'ampères lorsque le démarreur électrique du moteur est sollicité. C'est largement suffisant pour provoquer la fusion de fils et causer des brûlures dangereuses. Il est même possible de faire fondre du métal avec une batterie de voiture.

Les piles au lithium ont également une résistance interne très faible les rendant dangereuses en cas de court-circuit. Par conséquent, voici ce qu'il est important à retenir : une intensité élevée est aussi dangereuse qu'une tension élevée.

Historique : le watt

Le watt est une unité de puissance bien connue. Quand une puissance est appliquée pendant un certain temps, elle produit un travail. Un ingénieur dirait qu'un travail est produit quand une personne, un animal, ou une machine exerce une poussée pour vaincre une résistance mécanique. Par exemple, lorsqu'une voiture se déplace sur la route, elle surmonte la friction mécanique et la résistance de l'air, ou encore une personne qui monte un escalier triomphe de la force de gravitation.

Lorsqu'un watt de puissance est appliqué pendant une seconde, le travail fourni est de 1 joule, habituellement représenté par la lettre J. Si P représente la puissance, on a :

$$J = P \times s$$
$$\text{ou } P = J / s$$

Lorsque les électrons se déplacent dans un circuit, ils luttent contre une sorte de résistance ; ils produisent donc du travail.

La définition électrique du watt est simple :

$$\text{watts} = \text{volts} \times \text{ampères}$$

Cela correspond à la formule générale suivante de la puissance :

$$P = V \times I \text{ (puissance = tension} \times \text{intensité)}$$

En utilisant les unités courantes, les trois formules suivantes ont la même signification :

$$W = V \times A$$

$$V = W / A$$

$$A = W / V$$

Les termes milliwatt (mW), kilowatt (kW) et mégawatt (MW) sont fréquemment utilisés selon les situations (les mégawatts étant réservés aux équipements industriels comme les alternateurs des usines de production d'électricité). Prenez garde à ne pas confondre la lettre minuscule m de l'abréviation du milliwatt avec la lettre majuscule M de l'abréviation du mégawatt.

Milliwatts	Watts	Kilowatts
1 mW	0,001 W	0,000 001 kW
10 mW	0,01 W	0,000 01 kW
100 mW	0,1 W	0,000 1 kW
1 000 mW	1 W	0,001 kW
10 000 mW	10 W	0,01 kW
100 000 mW	100 W	0,1 kW
1 000 000 mW	1 000 W	1 kW

Figure 1-62. Table de conversion des multiples et sous-multiples du watt couramment utilisés.

Les anciennes lampes d'éclairage à incandescence étaient calibrées en watts, de même que les systèmes stéréophoniques.

Le watt a été ainsi nommé en hommage à James Watt, l'inventeur du moteur à vapeur. Parfois, les watts peuvent être convertis en chevaux-vapeur et vice versa.

Les résistances parviennent facilement à dissiper une puissance de 1/4 W, 1/2 W, 1 W ou plus. Dans tous les projets de ce livre, j'utilise des résistances de 1/4 W. Comment l'ai-je déterminé ?

Revenons au premier circuit avec une LED qui utilisait une pile de 9 V. Nous voulions que la résistance fasse chuter

la tension de 7 volts sous une intensité de 20 mA. Quelle puissance la résistance doit-elle dissiper ?

Voici ce que nous savons :

$V = 7$ (différence de potentiel aux bornes de la résistance)

$I = 20 \text{ mA} = 0,02 \text{ A}$

Nous devons déterminer la puissance P dissipée par la résistance :

$$P = V \times I$$

Remplaçons par les valeurs :

$$P = 7 \times 0,02 = 0,14 \text{ W}$$

Une résistance de 1/4 de watt (0,25 W) n'aura aucune difficulté pour dissiper 0,14 W. En fait, on aurait pratiquement pu utiliser une résistance de 1/8 de watt, mais, dans les expériences à venir, nous aurons besoin de résistance pouvant dissiper 1/4 de watt et il n'y a aucune contre-indication à utiliser une résistance supportant une puissance plus élevée que nécessaire.

Historique : les origines de la puissance

James Watt (figure 1-63) est considéré comme l'un des principaux inventeurs de la machine à vapeur. Né en 1736 en Écosse, il avait créé un petit laboratoire à l'université de Glasgow où il travaillait à la conception d'un moteur efficace, utilisant la vapeur pour actionner un piston dans un cylindre.

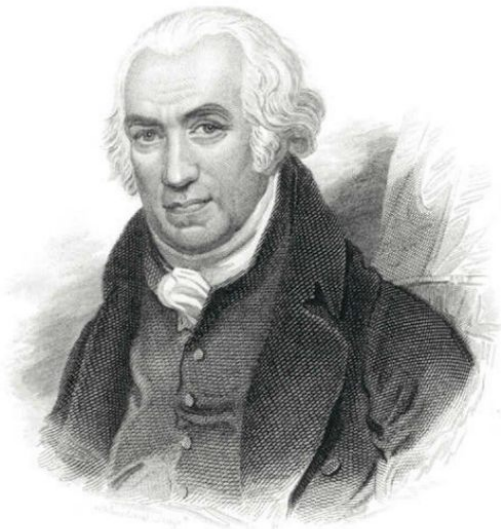


Figure 1-63. Le développement de la machine à vapeur par James Watt a facilité la révolution industrielle. Après sa mort, il fut récompensé par le choix de son nom pour représenter l'unité de puissance.

Confronté à des problèmes financiers et à des difficultés techniques pour usiner le métal, Watt ne proposa des premières applications qu'à partir de 1776.

Malgré ses difficultés à obtenir des brevets – qui ne pouvaient être parrainés que par un acte du Parlement à cette époque –, Watt et ses partenaires industriels gagnèrent beaucoup d'argent grâce à ses découvertes. En 1889 (70 ans après sa mort), son nom a été choisi comme unité de base de la puissance électrique pouvant se définir comme étant le produit de la tension par l'intensité.

Nettoyage et recyclage

La LED endommagée peut être jetée. Le reste est réutilisable.

Expérience 5 : fabriquons une pile

Quand le Web n'existait pas encore, les adolescents se livraient à des expériences sur un coin de table, par exemple la réalisation d'une pile en insérant un clou et une pièce de monnaie en cuivre dans un citron.

Maintenant que les LED émettent de la lumière avec seulement quelques milliampères, cette ancienne expérience de la pile au citron redevient intéressante. Si vous ne l'avez jamais réalisée, c'est le moment !

De quoi avez-vous besoin ?

- 2 citrons ou 1 bouteille de jus de citron pur
- Des pièces de monnaie cuivrées (comme les centimes d'euros)
- 1 collier de serrage galvanisé (plaqué au zinc) d'environ 2,5 cm de long ou plus, que l'on trouve dans les grandes surfaces de bricolage
- 5 fils de test équipés de pinces crocodiles à chaque extrémité
- 1 multimètre
- 1 LED à faible intensité nominale (voir page 6)

Mise en œuvre

Une pile est un composant électrochimique, ce qui signifie qu'une réaction chimique est utilisée pour produire de l'électricité. Cela fonctionne si on utilise les composants chimiques adéquats. Pour notre expérience, il s'agit du cuivre, du zinc et du jus de citron.

Vous procurer du jus de citron ne posera pas de problème. Vous pouvez aussi bien acheter des petites bouteilles de jus de citron concentré.

Des pièces de monnaie (1, 2 ou 5 centimes) fourniront le cuivre nécessaire. Assurez-vous que vos pièces sont assez récentes et bien brillantes. Si le cuivre est oxydé, il sera de couleur brun terne et l'expérience ne fonctionnera pas aussi bien.

Le zinc est un peu plus problématique. Vous devez utiliser un objet métallique *galvanisé*, ou enduit d'une fine couche de zinc pour la protéger de la rouille. Des petits colliers en acier galvanisé, d'environ 2,5 cm de long, s'achètent à bas coût dans votre magasin de bricolage.

Le test du citron : première partie

Coupez un citron en deux puis insérez une pièce de monnaie à l'intérieur. Aussi près que possible de la pièce, mais sans la toucher, insérez le collier galvanisé. Réglez alors votre multimètre pour mesurer une tension d'environ 2 V en courant continu, puis mettez en contact une de ses pointes de mesure avec la pièce de monnaie et l'autre avec le collier. Le multimètre doit afficher une valeur comprise entre 0,8 et 1 V.

Pour alimenter une LED, vous avez besoin d'une tension supérieure. Vous l'obtiendrez en reliant plusieurs piles en série ; en d'autres termes, plusieurs citrons ! Utilisez les fils de test pour relier les piles comme sur la figure 1-64. Remarquez que chaque fil relie une pièce à un collier. Ne reliez pas une pièce à une autre ou un collier à un autre.

Si vous avez préparé le tout correctement, en plaçant les pièces de monnaie assez proches des colliers et en prenant garde qu'ils ne se touchent pas, vous devriez pouvoir allumer votre LED à l'aide de trois piles au jus de citron connectées en série.

L'autre possibilité serait d'utiliser une petite boîte divisée en compartiments, comme sur la figure 1-65. Si tout est correctement aligné, versez un peu de jus de citron concentré. Du vinaigre ou du jus de raisin peuvent également convenir.

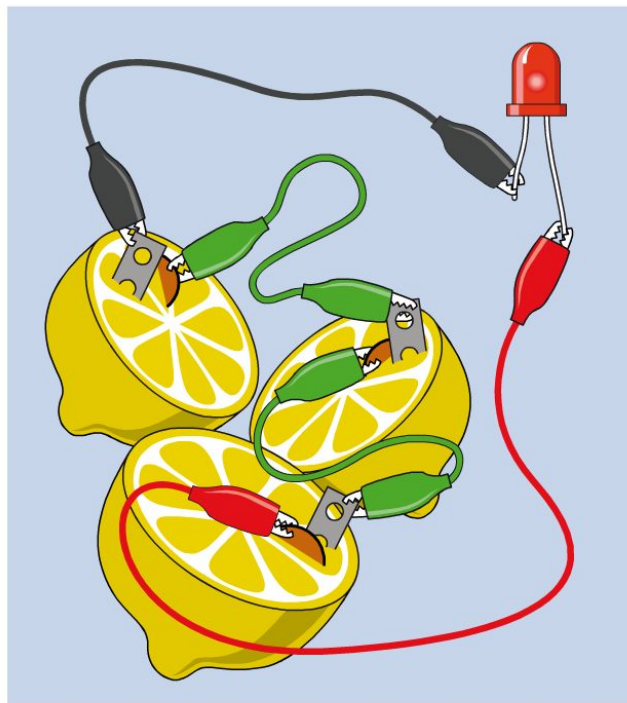


Figure 1-64. Une pile à trois éléments au citron devrait générer assez de tension pour allumer une LED à faible intensité.



Figure 1-65. Le jus d'un citron ou le jus concentré en bouteille produira les mêmes effets, même si le montage n'est pas très beau. Ici, une boîte à plusieurs cases a été utilisée pour construire une pile au jus de citron comportant quatre cellules.

J'ai décidé d'avoir quatre cellules dans ma pile car la LED fait chuter quelque peu la tension et la pile n'est pas à même de délivrer un courant suffisant pour endommager la LED. Le montage de la figure 1-65 a fonctionné immédiatement.

Théorie : la nature de l'électricité

Pour comprendre comment fonctionne la pile au jus de citron, vous devez commencer par acquérir quelques notions de base au sujet des atomes. Chaque atome est constitué d'un noyau en son centre, qui contient des protons, particules portant une charge positive. Ce noyau est entouré par des électrons qui portent chacun une charge négative.

Casser le noyau d'un atome requiert une très grande énergie et peut également libérer une énergie très élevée comme lors d'une explosion nucléaire. À l'inverse, forcer quelques électrons à quitter, ou rejoindre, un atome demande peu d'énergie. Par exemple, quand le zinc réagit chimiquement avec un acide, cela libère des électrons.

La réaction cesse rapidement si la partie zinguée n'est reliée à rien, les électrons s'accumulant sans pouvoir aller nulle part. Ils possèdent une force de répulsion qui les force à s'éloigner les uns des autres. On pourrait les comparer à une foule de personnes hostiles, où chacune souhaite le départ de l'autre et refuse d'être rejointe par de nouveaux individus (figure 1-66).

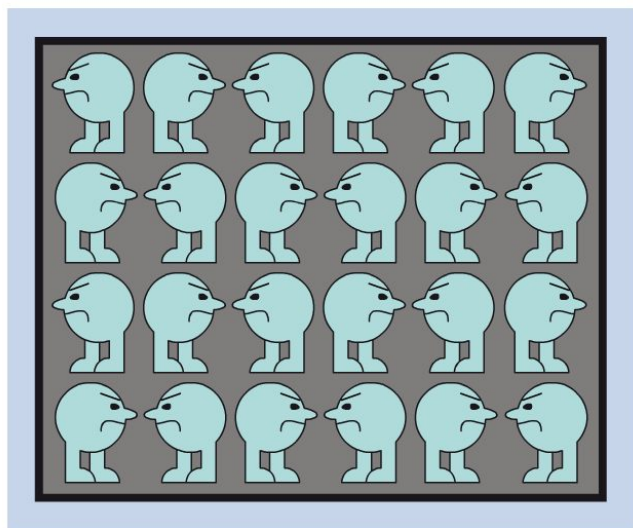


Figure 1-66. Les électrons sur une électrode ont une attitude négative connue sous le nom de répulsion mutuelle.

Considérons maintenant ce qui se passe quand un fil relie l'électrode de zinc qui possède un surplus d'électrons, à une autre électrode constituée d'un matériau différent, comme le cuivre, doté de «trous» que les électrons peuvent occuper. Les électrons traversent alors très facilement le fil, en sautant d'un atome à l'autre. Dès que l'on réalise un tel chemin, les électrons, mus par leur répulsion

mutuelle, tentent d'échapper les uns aux autres pour rejoindre un nouvel emplacement le plus rapidement possible (figure 1-67). C'est ainsi que le courant électrique est créé.

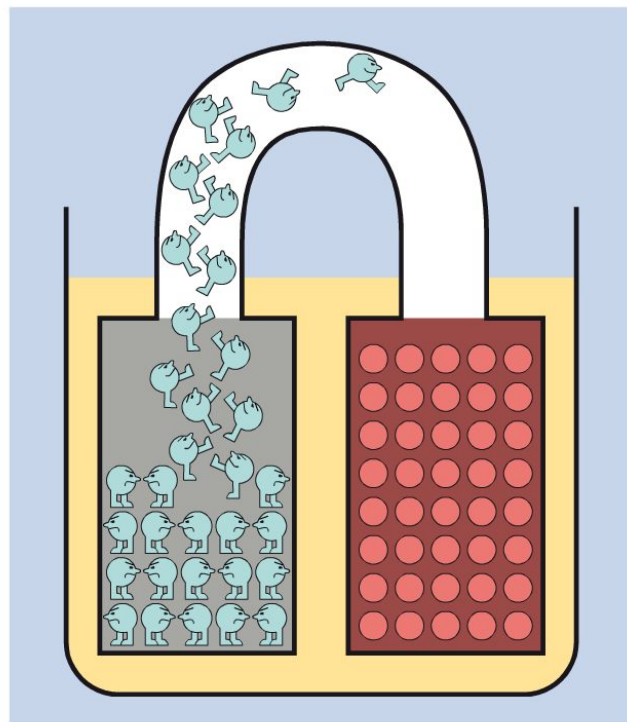


Figure 1-67. Électrons s'échappant d'une électrode de zinc pour rejoindre une électrode en cuivre.

Maintenant que la quantité des électrons sur l'électrode de zinc a été réduite, la réaction zinc-acide peut continuer, remplaçant les électrons manquants par des nouveaux, qui imitent aussitôt leurs prédécesseurs et tentent de s'éloigner les uns des autres, en empruntant le chemin offert par le fil. Ils se déplacent avec une telle force qu'on peut les dévier vers une LED, où ils libéreront alors un peu de leur énergie et provoquer l'allumage.

Le processus continue jusqu'à ce que la réaction zinc-acide s'arrête, en général parce qu'elle crée une couche d'un composé tel que l'oxyde de zinc, qui ne réagit pas avec l'acide et empêche la réaction de celui-ci avec le zinc, sous cette couche. C'est pour cela que votre électrode de zinc apparaît noirâtre lorsque vous la retirez de l'électrolyte acide.

Cette explication s'applique aux batteries *primaires*, c'est-à-dire celles qui sont prêtes à fournir de l'électricité dès qu'une liaison entre leurs bornes est établie, permettant aux électrons d'être transférés d'une électrode à l'autre.

La quantité d'électricité qu'une pile primaire peut fournir dépend de la vitesse à laquelle la réaction chimique interne libère les électrons. Quand le matériau des électrodes est entièrement utilisé par la réaction chimique, la pile ne peut plus générer d'électricité, elle est usée. Elle ne peut plus se recharger facilement car la réaction chimique s'inverse mal et les électrodes ont pu s'oxyder.

Dans une batterie rechargeable, également connue sous la désignation de *batterie secondaire*, un choix plus judicieux des électrodes et de l'électrolyte permet à la réaction chimique de s'inverser.

Historique : positif et négatif

Si l'électricité est un flux d'électrons qui possèdent chacun une charge négative, pourquoi dit-on que l'électricité s'écoule du pôle positif d'une pile vers son pôle négatif - ?

Cette histoire commence alors que Benjamin Franklin essaye de comprendre la nature du courant électrique. En étudiant les éclairs, il croit observer le déplacement d'un « fluide électrique » partant du positif vers le négatif. Il avance cette théorie en 1747.

En fait, Franklin commet une erreur fâcheuse, qui est corrigée en 1897, lorsque le physicien J.-J. Thomson annonce sa découverte de l'électron. L'électricité est un flux de particules chargées négativement qui se déplacent d'un endroit très négativement chargé, vers un autre endroit qui est « moins négatif » ou « plus positif ». Dans une pile, les électrons sont issus de l'électrode négative et ils s'écoulent vers l'électrode positive.

On pourrait penser qu'à partir de cette découverte, tout le monde s'est empressé d'oublier l'idée de Benjamin Franklin d'un flux s'écoulant du positif vers le négatif. Cependant, les gens avaient pris l'habitude de raisonner ainsi pendant 150 ans. Alors, quand un électron se déplace dans un fil, vous pouvez imaginer qu'une charge positive équivalente se déplace en sens inverse. Quand un électron quitte sa place, il emporte avec lui une petite charge négative ; son emplacement d'origine devient ainsi un peu plus positif. Quand cet électron parvient à sa nouvelle destination, sa charge négative rend celle-ci un peu moins positive. C'est ce qui se passerait si une particule positive imaginaire se déplaçait en sens inverse. Beaucoup des équations mathématiques décrivant le comportement de l'électricité demeurent valides si on les applique au déplacement de particules imaginaires chargées positivement.

Traditionnellement et par facilité, le concept erroné de Benjamin Franklin a survécu, étant donné qu'au bout du compte cela ne présente aucune différence.

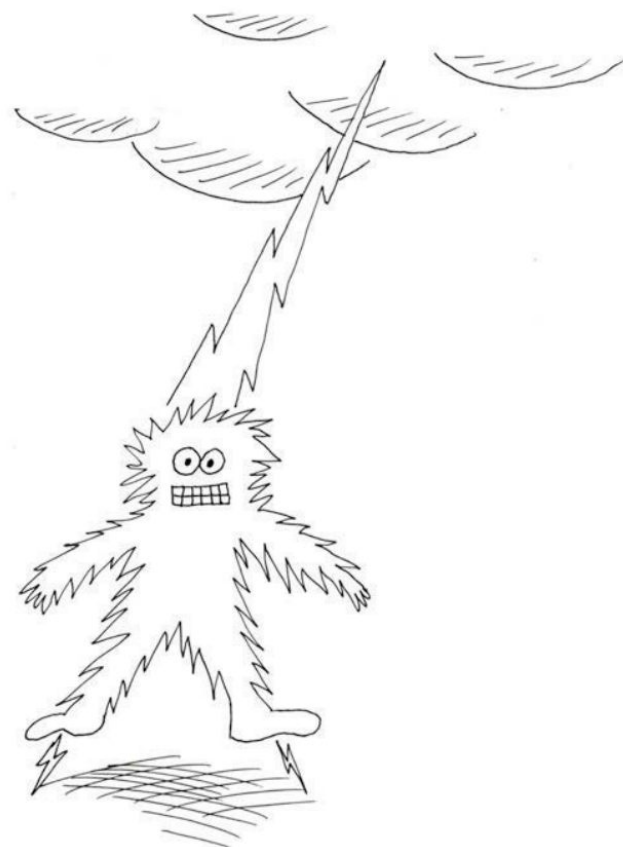


Figure 1-68. Sous certaines conditions atmosphériques, si vous êtes atteint par un éclair, le flux des électrons peut s'écouler du sol, en passant par vos pieds, jusqu'au sommet de votre tête et jusqu'aux nuages. Benjamin Franklin en aurait été surpris !

Sur les symboles des composants comme les diodes et les transistors, des flèches vous indiquent le sens dans lequel on doit les connecter – et ces flèches pointent du positif vers le négatif, bien que la réalité soit différente.

Quand Benjamin Franklin a étudié les éclairs, il les a imaginés comme une charge électrique se déplaçant d'un environnement positif (les nuages du ciel) vers un réservoir négatif (la planète Terre). Les nuages sont effectivement plus positifs, mais cela signifie simplement qu'en réalité un éclair est créé par le transfert d'électrons du sol vers le ciel. Autrement dit, une personne foudroyée peut l'être aussi bien par émission que par réception (figure 1-68).

Théorie : mesures de base

Je vais maintenant revenir aux définitions.

Le potentiel électrique se mesure en ajoutant la charge individuelle de chaque électron. L'unité de base est le coulomb, qui est égal à la charge de :

6 241 509 629 152 650 000 électrons.

Si vous connaissez le nombre des électrons qui traversent une section de fil chaque seconde, vous pouvez calculer le courant électrique s'exprimant en ampères :

1 ampère = 1 coulomb / seconde

Cela représente environ 6,24 quintillions d'électrons par seconde, qui est un nombre à 20 chiffres.

Il est impossible de visualiser les d'électrons traversant un fil électrique, car ils sont plus petits que la longueur d'onde de la lumière visible, ils sont trop nombreux et se déplacent trop rapidement. Il existe cependant des moyens indirects de les détecter. En effet, le mouvement d'un électron crée une force électromagnétique. Plus il y a d'électrons, plus le champ magnétique produit est important et cette force peut se mesurer. On peut calculer une intensité à partir de cela. Le compteur électrique de votre domicile fonctionne selon ce principe.

La force nécessaire pour pousser des électrons à travers un conducteur s'appelle la tension ; elle crée un flux qui peut générer de la chaleur, comme vous l'avez constaté en court-circuitant votre pile. Si le fil que vous avez utilisé avait une résistance égale à zéro, le courant le courant électrique passant au travers n'aurait produit aucune chaleur. Cette chaleur peut être directement utilisée, comme dans un four électrique ; on peut aussi utiliser l'énergie électrique selon d'autres façons, pour faire tourner un moteur par exemple. Dans tous les cas, l'énergie des électrons est utilisée pour produire un travail.

Un volt peut être défini comme la quantité de pression nécessaire pour créer un courant d'un ampère générant une puissance d'un watt. Comme défini précédemment, 1 volt = 1 watt / 1 ampère.

Cette écriture a plus de sens, car un watt peut être défini en termes non électriques. On peut revenir aux unités du système métrique de la façon suivante :

1 watt = 1 joule / seconde

1 joule = 1 newton force se déplaçant sur 1 mètre

1 newton accélère 1 kg d'1 mètre / seconde chaque seconde

En s'appuyant sur cette base, les unités électriques peuvent être liées à l'observation de la masse, du temps et de la charge des électrons.

Soyons pragmatiques

Pour des raisons pratiques, une compréhension intuitive de l'électricité est plus utile que la théorie. J'apprécie les analogies avec l'eau utilisées durant des décennies dans les manuels d'électricité. Sur la figure 1-31, j'ai montré comment la rapidité à laquelle l'eau s'écoule du trou d'un réservoir pouvait se comparer à l'intensité, alors que la hauteur de l'eau créait une pression comparable à la tension, tandis que le diamètre du trou était équivalent à la résistance.

Où se trouve la puissance dans cette analogie ? Supposons que vous placiez une petite roue à aube de sorte qu'elle puisse recevoir l'eau qui coule du trou (figure 1-69). Vous pourriez y relier un appareil mécanique. L'écoulement produirait alors du travail. Rappelez-vous que la puissance mesure le niveau du travail produit.

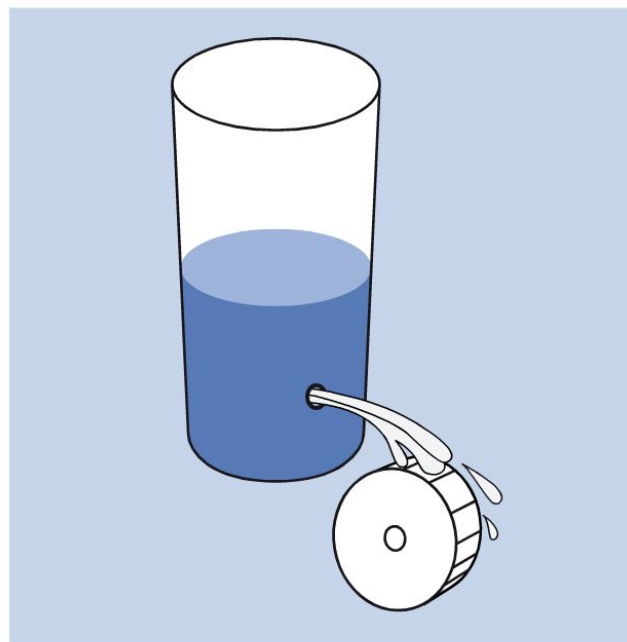


Figure 1-69. Si une roue à aube extrait l'énergie d'un écoulement d'eau, ce flux fournit un travail, qui peut être mesuré en watts pendant une certaine période de temps.

Vous pouvez penser que le résultat produit ne provient de rien, en extrayant un travail d'un écoulement d'eau, sans fournir aucune énergie au système. Pourtant, le niveau de l'eau dans le réservoir diminue. Si je prends en compte

les moyens de remettre l'eau écoulee dans le réservoir, il est évident que je dois fournir un travail pour obtenir un travail (figure 1-69).

De même, une pile peut sembler fournir une puissance sans en prélever, toutefois les réactions chimiques à l'intérieur transforment le métal pur en composants métalliques et la puissance que fournit la pile provient de ce changement d'état. Si c'est une pile rechargeable, il faut lui fournir, en retour, de l'énergie durant le processus de recharge, afin d'inverser les réactions chimiques.

Revenons au réservoir d'eau. Supposons qu'il ne puisse pas fournir assez d'énergie à la roue pour la faire tourner. Une solution consisterait à augmenter la hauteur de l'eau afin d'obtenir une force plus importante (figure 1-70).

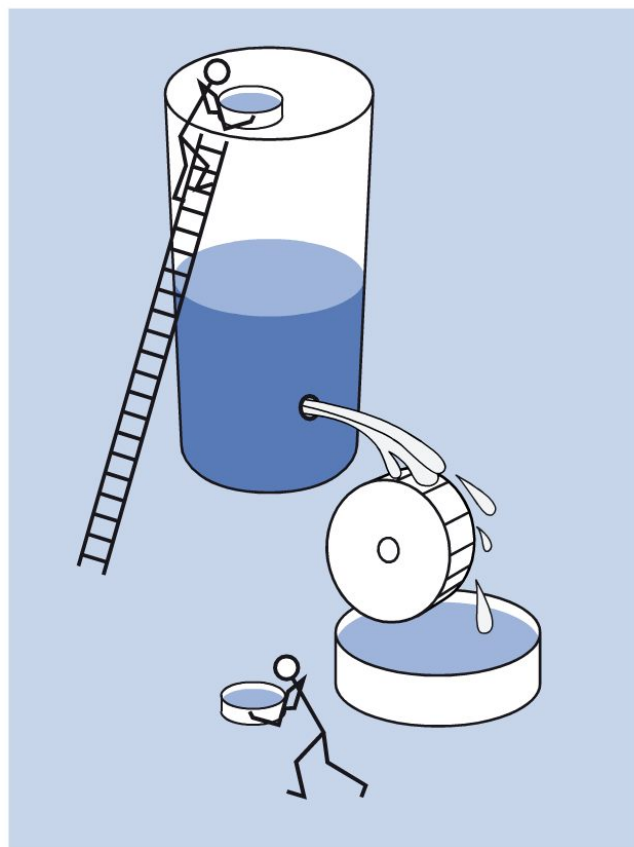


Figure 1-70. Pour continuer à obtenir de l'énergie du système, nous devons lui fournir du travail.

Ceci reviendrait à associer deux piles en les reliant l'une à l'autre, pôle positif au pôle négatif, en série (comme je l'ai suggéré avec les piles au jus de citron), pour doubler la

tension (figure 1-71). Si la résistance du circuit reste identique, une plus grande tension créera plus de courant, car $\text{intensité} = \text{tension} / \text{résistance}$.

Maintenant, comment faire tourner la roue deux fois plus longtemps si l'on a vidé le réservoir ? Peut-être pourrions-nous utiliser un second réservoir et relier leurs sorties à un même trou. De même, si vous reliez deux piles côte à côte, en parallèle, vous obtenez une tension identique, mais les piles dureront deux fois plus longtemps. Alternativement, les deux piles pourraient délivrer une intensité plus importante qu'une seule (figure 1-72).

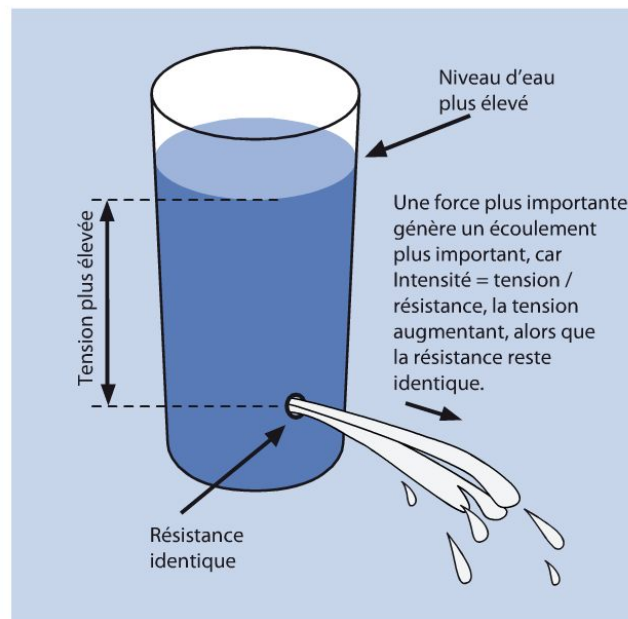


Figure 1-71. La quantité de travail disponible augmente quand la pression augmente.

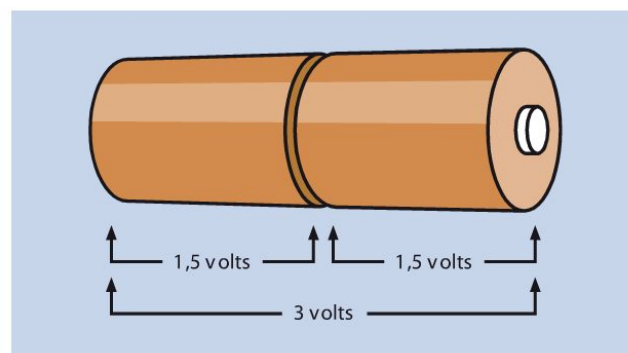


Figure 1-72. Deux piles en série fournissent une tension deux fois plus élevée qu'une seule pile, à condition qu'elles soient toutes deux totalement chargées.

En résumé :

- Deux piles en série délivrent deux fois plus de tension.
- Deux piles en parallèle peuvent fournir une intensité identique pendant deux fois plus de temps, ou deux fois plus de courant pendant un temps identique.

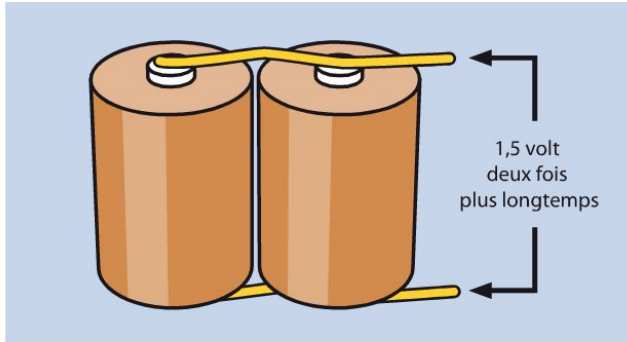


Figure 1-73. Deux piles en parallèle, alimentant une charge identique, vont fonctionner deux fois plus longtemps. Alternativement, elles pourront fournir une intensité double pendant le même temps qu'une seule pile.

Assez de théorie ! Dans le chapitre suivant, des expériences fondées sur vos connaissances en électricité vous conduiront progressivement à la réalisation de dispositifs utiles et amusants.

Nettoyage et recyclage

Le matériel que vous avez immergé dans les citrons ou leur jus a pu se décolorer mais reste utilisable. En revanche, des ions de zinc ont pu se déposer sur les citrons, donc ne les consommez pas !

Principes de commutation

2

La notion de commutation est apparemment simple, mais il ne s'agit pas seulement d'une action manuelle, où un courant électrique est utilisé pour commuter et contrôler un autre courant. C'est un principe si fondamental qu'aucun composant numérique n'existerait sans lui.

De nos jours, la commutation s'effectue principalement par des transistors. Je les aborderai en détail, mais avant, je vais illustrer le concept à l'aide des relais dont le fonctionnement est plus simple à comprendre, car vous pouvez observer ce qui se passe à l'intérieur. Étudions tout d'abord les interrupteurs activés manuellement. La séquence se compose ainsi : interrupteurs - relais - transistors.

Dans ce chapitre, je vais également aborder les condensateurs, car la notion de capacité est aussi incontournable que celle de résistance dans les circuits électroniques.

Matériel du chapitre 2

Comme précédemment, référez-vous au chapitre 6 pour acheter outils, fournitures et composants.

Outils

Essentiel : petits tournevis

Vous possédez peut-être déjà des tournevis, mais ils risquent d'être trop gros pour la plupart des petites vis présentes sur les composants. La qualité de l'acier des tournevis peut également avoir son importance. Un ensemble de tournevis comme celui de la figure 2-1 conviendra parfaitement.



Figure 2-1. Tournevis miniatures avec bouts plats et à croisillons Philips. Les carreaux blancs mesurent 2,5 cm de côté.

Essentiel : petite pince plate allongée

Le type de *pince plate allongée* dont vous avez besoin ne doit pas excéder 13 cm de long. Vous l'utiliserez pour plier avec précision les fils, ou pour saisir délicatement des petits éléments. Pour cette sorte d'opération, vous n'obtiendrez pas de meilleurs résultats à l'aide d'outils haut de gamme, vous pouvez choisir les plus économiques. La figure 2-2 en montre un exemple qui possède une poignée avec ressorts de rappel qui ne conviennent pas à tout le monde.



Figure 2-2. Une pince plate convenant aux travaux d'électronique ne doit pas dépasser 13 cm de long.

Optionnel : pince à bec pointu

C'est une sorte de pince plate à bec long mais pointu. Elle est pratique pour atteindre des composants rapprochés sur une plaque de montage. Vous pourrez vous la procurer sur Internet ou dans les magasins spécialisés dans les travaux manuels de perles. Attention à ne pas choisir une pince avec les bouts arrondis, permettant de faire des boucles aux extrémités des fils. Pour notre usage, la surface interne du bec de la pince doit être plate, comme sur la figure 2-3.



Figure 2-3. Pince à bec long permettant des travaux précis à petite échelle.

Essentiel : pince coupante

Les pinces plates possèdent souvent une partie coupante, située près de leur axe, et que vous pouvez utiliser pour découper vos fils. Souvent, cependant, vos fils seront

attachés à un autre élément et vous aurez du mal à les atteindre avec vos pinces plates. Vous aurez alors besoin d'une *pince coupante* (figure 2-4). Elle ne devrait pas dépasser 13 cm de long. Étant donné que vous n'aurez que du fil de cuivre souple à couper, vous n'avez pas besoin de pinces de grande qualité.



Figure 2-4. Les pinces coupantes ne doivent pas dépasser 13 cm de long.

Optionnel : pince coupante de précision

Les *pinces coupantes de précision* (figure 2-5) sont plus fines, plus petites et plus adaptées au travail dans des espaces restreints. En revanche, elles sont moins robustes. Le choix d'utiliser des pinces coupantes traditionnelles ou de précision se fera en fonction de vos préférences.



Figure 2-5. Les pinces coupantes de précision permettent de travailler dans des espaces plus restreints que les pinces coupantes traditionnelles.

Essentiel : pince à dénuder

Les fils que vous allez utiliser ont une gaine isolante en plastique. Les *pinc*es à dénuder sont spécialement conçues pour retirer une petite longueur d'isolant afin de rendre accessible la partie conductrice du fil. Les plus machos prétendront qu'ils n'ont pas besoin d'outil pour cette opération. Mes deux dents de devant ébréchées témoignent que c'est vraiment une mauvaise approche (figure 2-6).

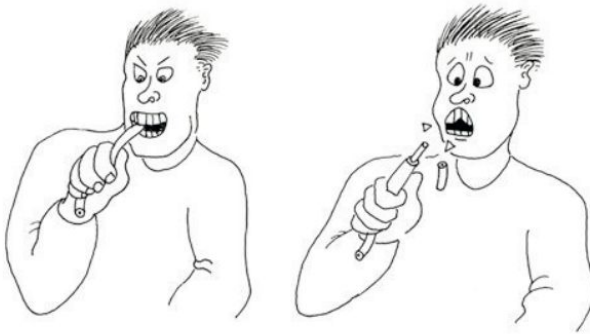


Figure 2-6. Vous ne trouvez pas votre pince à dénuder ? Ce n'est pas une raison pour utiliser vos dents !

Une autre possibilité consiste à utiliser une pince coupante (figure 2-7). Tout en maintenant le fil d'une main, refermez les mâchoires de la pince sans forcer avec l'autre main, puis éloigner vos deux mains. Cela requiert de l'habileté et une bonne pratique. Parfois, la pince coupante glisse sans dénuder le fil, ou peut le couper au lieu de le dénuder.

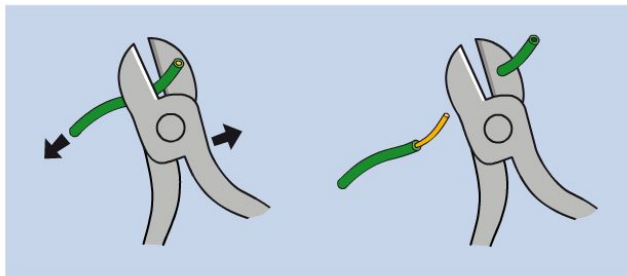


Figure 2-7. Utilisation d'une pince coupante pour dénuder un fil. Une pince à dénuder est plus facile à utiliser.

Pour quelques euros de plus, une pince à dénuder rendra votre travail bien plus facile.

Dans la première édition de ce livre, je proposais d'acheter en option une pince à dénuder automatique, qui peut être utilisée d'une seule main. Mais ces pinc

es trop fines ($\varnothing < 0,6$ mm) comme dans les expériences de ce livre. Aussi je ne les recommande plus.

On rencontre fréquemment le type d'outil de la figure 2-8. Certaines marques proposent des poignées inclinées, d'autres ont des poignées droites, cela n'a pas vraiment d'importance. Leur fonctionnement reste le même : il suffit d'insérer le fil dans le trou de diamètre approprié, de refermer les mâchoires et de retirer l'isolant.



Figure 2-8. 0,25 mm à 0,8 mm de diamètre (jauge américaine 20 à 30).

Vous devez vous assurer que la pince choisie peut dénuder les fils que vous allez utiliser.

La *jauge américaine* (ou *AWG American Wire Gauge*) est une mesure de la section d'un conducteur. Plus le chiffre est élevé, plus le fil est mince. Le fil de jauge 20 ($\varnothing = 0,812$ mm) est trop gros pour notre usage, alors qu'un fil de jauge 24 ($\varnothing = 0,511$ mm) est, lui, trop petit. Le fil optimal est donc de jauge 22 ($\varnothing = 0,644$ mm). Vous vous faciliterez la tâche en achetant une pince à dénuder spécifiquement prévue pour ce type de fil. Comme vous pouvez le remarquer sur la figure 2-8, une pince prévue pour les fils AWG 20 à AWG 30 possède un trou pour la jauge 22. C'est l'outil approprié pour votre usage.

Essentiel : plaques de montage

Les *plaques de montage* ne sont nécessaires qu'à partir de l'expérience 8. Je vais néanmoins vous les présenter ici. Une plaque de montage est une petite dalle en plastique perforée de trous espacés de 2,54 mm (0,1 pouce). Les trous sont prévus pour y insérer les composants et les fils. Sous le plastique, des parties conductrices assurent une liaison électrique entre les rangées de trous.

Une plaque de montage sert à relier les composants de façon beaucoup plus propre qu'avec les fils de test utilisés jusqu'à présent et plus facilement que s'ils étaient soudés.

Une plaque de montage, également appelée *plaque d'essais sans soudure*, est parfois appelée *plaque de prototypage*.

La marque ou l'origine n'est pas importante ; prenez simplement la précaution de vous procurer le même type de plaque que dans ce livre. Vous avez trois choix possibles, mais un seul est convenable :

- **Option 1** : la mini plaque d'essais (figure 2-9). Souvent vendue comme convenant aux montages à base de microcontrôleur Arduino, elle n'a pas assez de trous pour notre usage.



Figure 2-9. Cette mini plaque d'essais n'est pas assez grande pour la plupart des projets de ce livre.

- **Option 2** : la plaque à bus simple (figure 2-10). Le terme « bus » se réfère à une longue rangée de trous longeant les petites rangées de trous numérotées. Il y a un bus unique de chaque côté de la plaque, entouré en rouge sur la photo. C'est une plaque de ce type qu'il vous faut. Elle doit avoir 60 rangées de trous et 700 points de connexion.

Vous pouvez, si vous préférez, utiliser une plaque à bus double et simplement ignorer les trous supplémentaires.

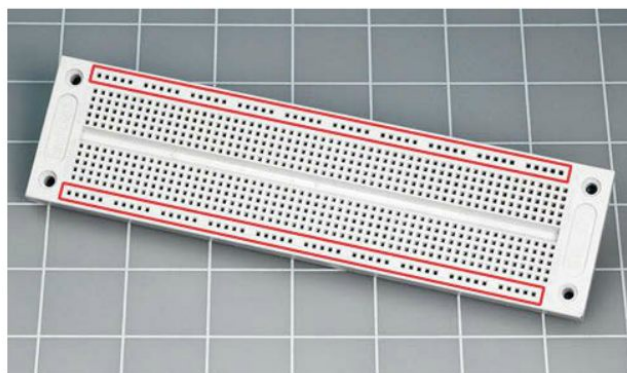


Figure 2-10. Plaque d'essais à bus simple ayant une seule longue rangée de trous de chaque côté de la plaque.

- **Option 3** : la plaque à bus double (figure 2-11). Elle possède deux longues rangées de trous de chaque côté de la plaque, constituant ses bus doubles. Depuis la première édition de cet ouvrage, je me suis rendu compte que ce type de plaque favorisait les erreurs de câblage chez les utilisateurs néophytes ; je ne la recommande donc plus.

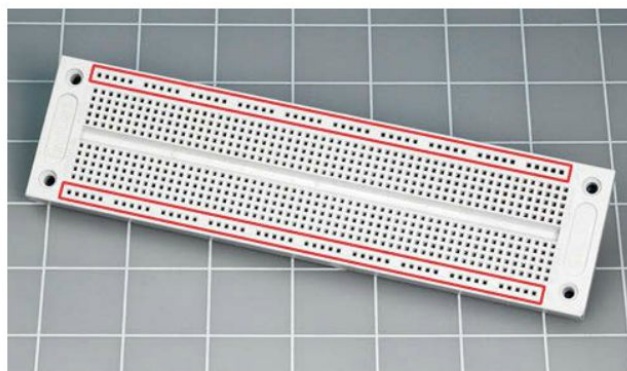


Figure 2-11. Une plaque d'essais à bus double possède deux paires de longues rangées de trous, repérées en rouge sur cette photo. Ce type de plaque n'est plus recommandé.

Une seule plaque devrait suffire puisqu'elles sont réutilisables, mais vous pouvez en acheter deux ou trois, ainsi vous ne serez pas obligés de démonter les circuits précédents.

Fournitures

Essentiel : fil de câblage

Le type de fil dont vous avez besoin pour réaliser les connexions sur une plaque d'essais est fréquemment appelé *fil de câblage*. On le trouve en bobines ou, parfois,

en vrac. Quoi qu'il en soit, il doit être de type monobrin et de jauge 22 (AWG22, $\varnothing = 0,6$ mm environ). On le trouve en bobines de diverses longueurs, comme sur la figure 2-12.



Figure 2-12. Fil de câblage monobrin en bobines.

Le fil est moins cher au mètre, mais je vous recommande de l'acheter en plus petite quantité, en choisissant au moins trois couleurs différentes. Ce sera pratique pour la recherche d'erreurs dans un circuit que vous construirez. Le rouge et le bleu peuvent être utilisés pour les liaisons aux pôles positif et négatif de l'alimentation respectivement, une couleur différente étant alors utilisée pour les autres liaisons.

Lorsque la gaine isolante est retirée, le fil se présente sous forme d'un brin unique (figure 2-13). En comparaison avec le fil à plusieurs brins de la figure 2-14, ce type de fil est beaucoup plus facile à insérer dans une plaque d'essais.

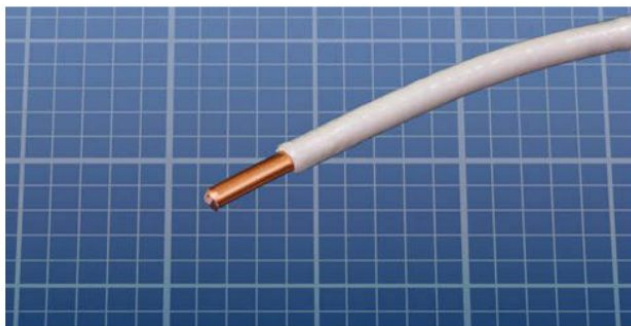


Figure 2-13. Il doit y avoir un fil avec un seul conducteur à l'intérieur de la gaine isolante.



Figure 2-14. Pour des besoins spécifiques, le fil à plusieurs brins peut être très utile.

Tout comme j'ai fortement recommandé une pince à dénuder prévue pour le fil de jauge 22, je vous recommande maintenant tout aussi fortement d'acheter du fil qui corresponde bien à la jauge AWG 22, pas à la AWG 20, ni à la AWG 24. Vous trouveriez que le fil AWG 24 n'est pas fermement maintenu dans les trous de votre plaque d'essais et que celui de jauge AWG 20 ne rentre pas facilement dans les trous et est difficile ensuite à en retirer.

Certains fils de câblage dont le conducteur est de couleur argentée sont dits « étamés ». D'autres sont constitués de fil de cuivre pur. Les uns comme les autres conviennent.

Pour la réalisation des circuits de ce livre, il vous faudra environ 8 mètres de chacune des trois couleurs. Toutefois, les expériences 26, 28 et 29 nécessitent que vous réalisiez un bobinage de fil, afin de découvrir la relation entre électricité et magnétisme, ainsi que pour construire votre récepteur radio à cristal. Si vous voulez réaliser ces projets, vous aurez besoin d'environ 60 mètres de fil.

Fil de pontage ou cavaliers

Si vous coupez une petite longueur de fil dont vous dénudez chaque extrémité sur environ 6 à 10 mm, puis les repliez pour l'insérer dans votre plaque d'essais, vous venez de réaliser un *fil de pontage ou cavalier*, qui crée une liaison entre deux trous de la plaque d'essais en « sautant » au-dessus des autres trous. Les cavaliers permettent de réaliser un câblage propre et clair dans lequel il sera facile de trouver d'éventuelles erreurs.

La difficulté est de dénuder et plier correctement les extrémités, même en utilisant les outils adéquats. Vous serez peut-être tenté d'acheter des fils *prédécoupés* formant des cavaliers (figure 2-15).



Figure 2-15. Assortiment de fils prédécoupés et dénudés pour utilisation avec une plaque d'essais.

L'inconvénient des fils prédécoupés est que leur couleur dépend de leur longueur et non de leur fonction. Les fils rouges font 5 mm de long, les fils jaunes 7,5 mm et ainsi de suite.

La couleur des fils doit être en accord avec leur rôle dans un circuit. Ainsi, les fils rouges seront toujours reliés au pôle positif de l'alimentation, peu importe leur longueur.

La seule solution pour respecter cette pratique est de les façonner soi-même. Vous pouvez parfaitement utiliser des fils prédécoupés, mais, ils ont aussi l'inconvénient d'être plus onéreux.

Beaucoup de personnes préfèrent utiliser une sorte différente de fils de pontage avec, à chaque extrémité, un petit connecteur prévu pour être inséré dans les trous d'une plaque de montage. Ces cavaliers insérables sont vendus en assortiments et c'est probablement ce que vous trouverez le plus facilement sur Internet.

Comme ils sont flexibles et mesurent environ 8 cm, vous pouvez les utiliser pour réaliser pratiquement toutes les connexions sur une plaque de montage. Ils sont réutilisables et apparaissent comme la solution la plus simple, rapide et peu coûteuse.

Parfait ! Mais si vous faites une erreur de câblage, vous aurez beaucoup de difficulté pour identifier le problème. La figure 2-16 montre un petit circuit réalisé à l'aide de ces fils flexibles munis de connecteurs à leurs extrémités. La figure 2-17 montre le même circuit réalisé avec des cavaliers créés manuellement. Chacun de ces circuits contient une erreur de câblage. Sur celui avec les cavaliers, j'ai pu

trouver l'erreur en quelques secondes, alors que sur celui utilisant des fils de pontage avec les petits connecteurs, j'ai dû me plonger dans son dédale pendant un bon moment avec un multimètre pour rechercher le défaut.

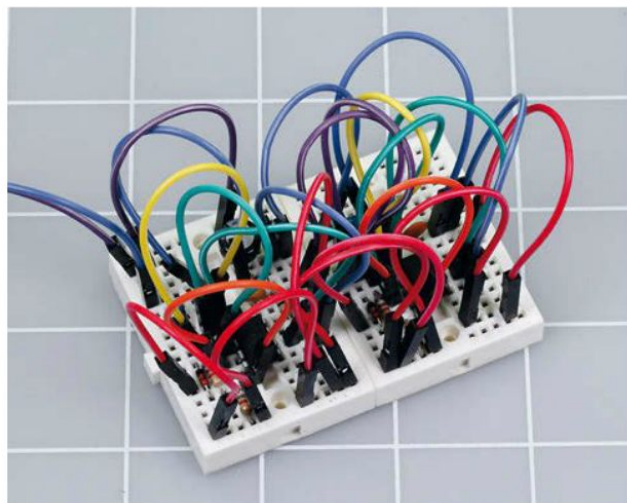


Figure 2-16. Circuit réalisé sur deux mini-plaques de montage en utilisant des fils de pontage souples munis de connecteurs à chaque extrémité.

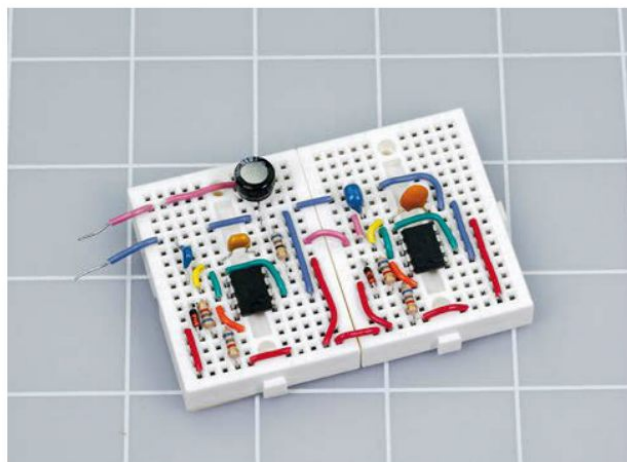


Figure 2-17. Le même circuit réalisé à l'aide de fils de pontage créés manuellement.

Pour rendre les choses encore plus délicates, les connecteurs des fils souples sont parfois défectueux et peuvent provoquer des liaisons ouvertes. Cela rend la recherche d'erreurs quasiment impossible. Je ne recommande donc pas les fils de pontage souples, munis de connecteurs.

Optionnel : fils à plusieurs brins

Les fils à plusieurs brins présentent un avantage. Plus souples, ils sont utiles lorsqu'on réalise des connexions à l'extérieur d'une plaque de montage, par exemple avec un potentiomètre ou un interrupteur. Leur flexibilité est essentielle si le fil réalise une liaison avec un objet en mouvement ou qui vibre.

Même si les fils souples ne sont pas obligatoires pour les projets de ce livre, 60 cm de fil à plusieurs brins de jauge AWG 22 seront parfois utiles. Si vous en achetez, je vous suggère de choisir une couleur différente de celles de vos fils cavaliers, afin de ne pas les confondre.

Composants

Essentiel : interrupteur à levier

Un *interrupteur à levier* de taille standard est un composant assez ancien, très utile cependant pour vos expériences sur la commutation.

Il vous en faudra deux. Ils sont identifiés selon le terme SPDT (*Single Position Double-Throw*) ou unipolaire à deux positions ou encore unipolaire inverseur. J'expliquerai cela en détail un peu plus tard. Un interrupteur DPDT, c'est-à-dire à deux jeux de contacts peut également être utilisé ; toutefois, il sera plus cher.

Un interrupteur à levier avec des *cosses à vis* facilitera la connexion des fils, mais les autres types de cosse conviendront également.

Un interrupteur à levier de taille standard (référence E-Switch ST163D00) est montré sur la figure 2-18, mais vous pourrez trouver des modèles génériques beaucoup moins coûteux sur Internet.



Figure 2-18. Interrupteur à levier de taille standard.

Essentiel : interrupteur tactile

Un interrupteur tactile n'est pas ce que son nom pourrait évoquer en votre esprit. C'est un bouton-poussoir miniature. Si vous l'insérez dans votre plaque de montage, c'est une façon pratique, pour un circuit, de recevoir un ordre de la part de l'utilisateur.

L'interrupteur tactile le plus commun possède quatre petites broches lui permettant de s'insérer dans une plaque de montage. Cela peut toutefois se révéler ennuyeux car les broches ne s'insèrent pas toujours correctement. L'interrupteur peut alors, sans prévenir, se comporter comme une sauterelle, au moment le moins opportun. Je vous suggère d'utiliser un bouton-poussoir muni de deux cosse espacées de 5,08 mm. Le modèle ALPS SKRGAFD-010 sera utilisé dans les projets de ce livre (figure 2-19). Tout autre bouton-poussoir tactile ayant deux broches espacées de 5,08 mm fera l'affaire, comme la série Panasonic EVQ-11.



Figure 2-19. Modèle de bouton-poussoir recommandé pour les projets de ce livre réalisés sur plaque de montage.

Essentiel : relais

Comme le brochage des *relais* n'est pas standardisé, vous devrez faire très attention au moment de l'achat. Le modèle Omron G5V-2-H1-DC9 (figure 2-20) devrait minimiser tout risque de confusion car la fonction de chaque broche est imprimée sur son boîtier.

Omron est un grand fabricant de relais, mais vous pouvez également utiliser le Axicom V23105-A5006-A201 ou le Fujitsu RY-9W-K. Ce sont tous des relais DPDT à double contact inverseur dont les broches sont disposées selon le plan à gauche de la figure 2-21. Si leur espacement est indiqué en millimètres, 5 mm et 5,08 mm sont presque

identiques à 0,2 pouce de même que 7,5 mm et 7,62 mm à 0,3 pouce.



Figure 2-20. Relais recommandé pour les projets de ce livre.

Si un schéma est imprimé sur le boîtier, il devrait ressembler à celui de la partie droite de la figure 2-21. Si nécessaire, consultez la fiche technique du fabricant. Vous pouvez utiliser des relais dont les broches ont des fonctions différentes, mais cela occasionnera quelques difficultés car ils ne correspondront pas aux plans que je fournis.

Les relais recommandés sont de type haute sensibilité ce qui signifie qu'ils consomment peu de courant. Quel que soit le type que vous choisirez, il doit avoir une tension de bobine de 9 V CC et une disposition des broches identique.

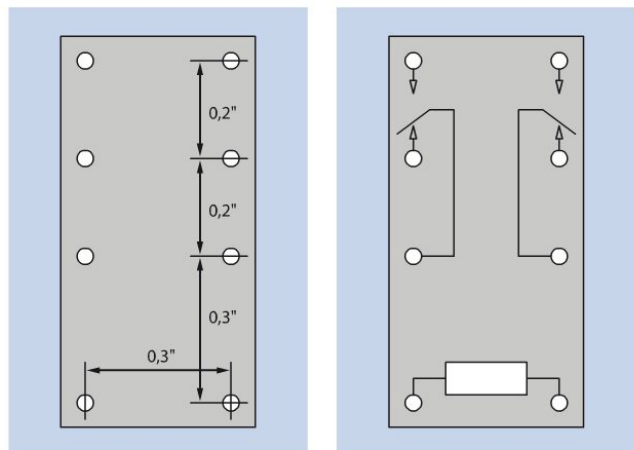


Figure 2-21. Les espacements, les fonctions et les connexions internes des broches du relais devraient correspondre à ce schéma (avec $0,2' = 5,08 \text{ mm}$ et $0,3' = 7,62 \text{ mm}$).

Vérifiez également si le relais que vous achetez impose une polarité, c'est le cas de beaucoup de modèles Panasonic. En effet, si le courant circule dans un sens spécifique, il ne fonctionnera pas si le courant circule en sens opposé. J'ai recommandé des relais qui n'imposent pas une polarité particulière ; lisez avec attention les fiches techniques avant de faire votre achat.

Pour terminer, le relais que vous devez acheter doit être sans verrouillage.

Si tout cela vous paraît confus et trop technique, vous pouvez repousser l'achat de vos relais jusqu'à l'expérience 7, qui explique la façon de les utiliser. Vous aurez besoin de deux relais pour réaliser entièrement cette expérience.

Essentiel : potentiomètre ajustable

Au lieu du gros potentiomètre rustique que vous avez utilisé lors de l'expérience 4, vous allez maintenant utiliser un *potentiomètre ajustable* qui est plus petit, moins coûteux et peut s'insérer dans les trous d'une plaque de montage.

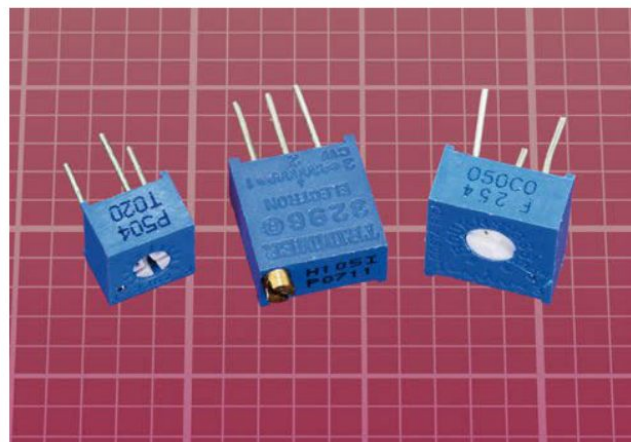


Figure 2-22. Potentiomètres ajustables.

Les potentiomètres ajustables, visibles à gauche et à droite sur la figure 2-22, sont ceux qui sont utilisés dans nos expériences. Ils s'insèrent directement dans la plaque de montage. La seule différence entre ces deux potentiomètres est leur taille.

Celui au centre de la figure 2-22 est un modèle *multi-tour*, qui permet un ajustement plus précis par une vis en laiton munie d'un pas de vis interne. C'est un modèle moins pratique, plus cher et surtout, nous n'avons pas l'utilité d'une telle précision.

Essentiel : transistors

Un seul type de *transistor* est utilisé dans ce livre, La référence générique est 2N2222, mais hélas, tous les transistors 2N2222 ne sont pas identiques.

Lorsque vous achèterez vos composants, vous devrez impérativement éviter les références dont le nombre 2222 est précédé par P2N. Quand le P2N2222 a été introduit sur le marché, les fabricants ont inversé le brochage bien que le 2N2222 ait été standardisé depuis des dizaines d'années.

Voici les règles à suivre.

- Les références 2N2222 ou PN2222, ou PN2222A conviennent. Le PN2222 est maintenant une référence plus courante que le 2N2222, mais tous deux conviennent.
- Les références P2N2222 ou P2N2222A *ne conviendront pas*.

Soyez donc prudent lors de vos achats ! Et si vous avez un multimètre qui peut tester les transistors, vérifiez chacun d'entre eux. Si le transistor utilise le brochage classique, le multimètre devrait vous indiquer un gain en amplification supérieur à 200. Si vous êtes en présence du mauvais type de transistor, le gain indiqué sera inférieur à 50.

Les transistors 2N2222 étaient d'abord encapsulés dans des petits boîtiers métalliques. Maintenant, ils sont pratiquement tous réalisés en plastique. Un exemple de chaque type est représenté sur la figure 2-23. Le modèle en plastique et le modèle métallique fonctionnent tous deux de façon identique – à condition que leur référence ne commence pas par P2N.

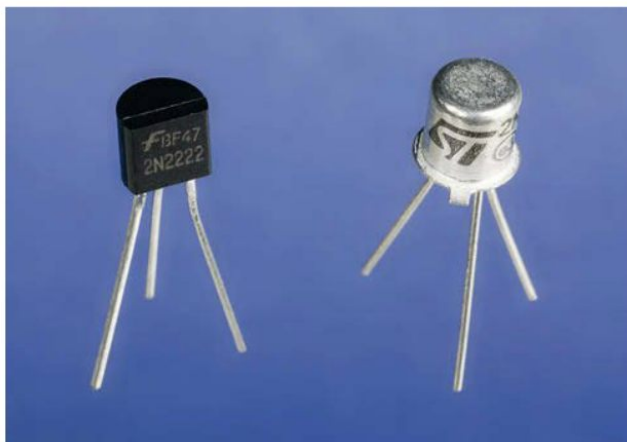


Figure 2-23. Deux transistors 2N2222. L'un ou l'autre convient.

Essentiel : condensateurs

Les *condensateurs* ne sont pas aussi bon marché que les résistances. Ils demeurent néanmoins assez abordables pour que vous puissiez envisager d'en acheter un assortiment. Les valeurs des condensateurs que vous allez utiliser se mesurent le plus souvent en microfarads (μF). Je vous expliquerai cela en détail lorsque vous commencerez à utiliser les condensateurs dans vos circuits.

Pour les petites valeurs, des condensateurs en *céramique* sont recommandés. Pour des valeurs plus importantes, les condensateurs *électrochimiques* (ou *électrolytiques*) sont moins coûteux. Différents types de condensateurs sont représentés sur la figure 2-24. Les modèles cylindriques sont des condensateurs électrochimiques, les autres sont en céramique.

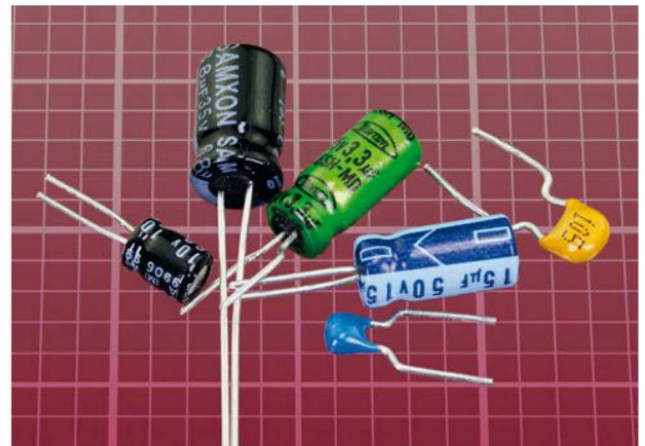


Figure 2-24. Assortiment varié de condensateurs.

Essentiel : résistances

Lors de l'achat de vos composants, au début de cet ouvrage, vous avez probablement déjà acheté un assortiment de résistances.

Essentiel : haut-parleur

Le diamètre minimal pour un *haut-parleur* (*loudspeaker* en anglais) est d'environ 2,5 cm ; un modèle de 5 cm sera parfait. Il ne devra pas dépasser 7,5 cm et son impédance devra être d'au moins 8 Ω .

Lors de la recherche d'un haut-parleur, rappelez-vous que certains fabricants les nomment « speakers ». Une recherche pour « loudspeaker » ou « haut-parleur » pourrait ne pas vous donner tous les résultats attendus.

Nous n'allons pas générer de sons en haute-fidélité. Dès lors, tout haut-parleur bon marché conviendra (figure 2-25).

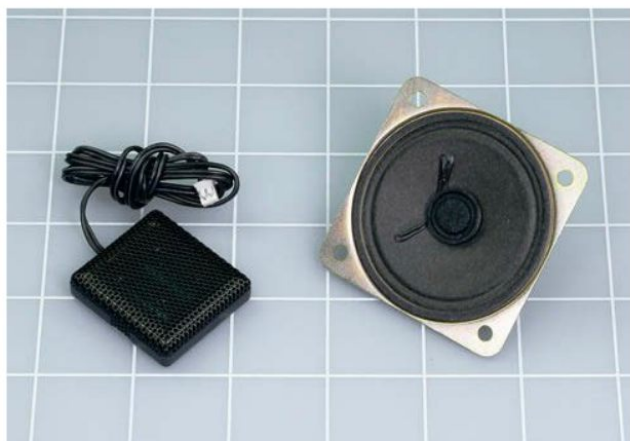


Figure 2-25. Deux haut-parleurs : l'un de 2,5 cm de diamètre, l'autre de 5 cm.

Quoi d'autre ?

L'ensemble de ce matériel sera réutilisable et vous n'aurez pas besoin de beaucoup plus de composants pour les prochaines expériences.

Expérience 6 : une commutation très simple

Cette expérience va vous familiariser avec le fonctionnement des interrupteurs manuels, qui n'est pas très compliqué. Par la suite, lorsque deux inverseurs seront utilisés conjointement dans un circuit, le sujet deviendra plus intéressant.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 tournevis, une pince coupante, une pince à dénuder
- Du fil de câblage de jauge AWG 22, pas plus de 30 cm
- 1 pile de 9 V
- 1 LED générique
- 2 interrupteurs à levier, SPDT (inverseur unipolaire), ou DPDT (double inverseur)
- 1 résistance de 470 Ω
- 2 fils de test possédant des pinces crocodiles à leurs extrémités

Assemblez tous les éléments comme indiqué sur la figure 2-26. Vous devrez vous entraîner à dénuder les fils, ici pour mettre à nu les deux extrémités des fils noirs. Pour les relier de façon permanente aux cosses à vis, essayez de replier leurs extrémités à l'aide de votre pince plate afin de leur donner la forme d'un J. Glissez-les par la gauche, sous les vis, qui les entraîneront lorsque vous les serrerez, sans trop forcer, dans le sens des aiguilles d'une montre.

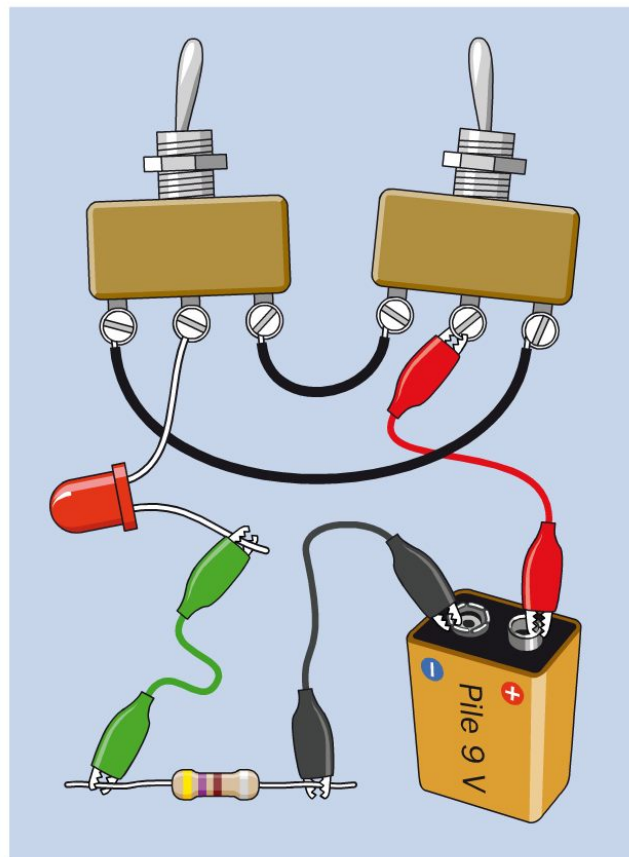


Figure 2-26. Votre première expérience de commutation.

Le fil le plus long de la LED sera également relié à une cosse à vis. N'utilisez pas, par erreur, le fil le plus court. Rappelez-vous que le fil le plus long doit toujours être plus positif que le fil court.

Si vos interrupteurs ne possèdent pas de cosses à vis, vous devrez utiliser deux fils de test avec pinces crocodiles au lieu des fils noirs et un autre fil de test pour relier la LED à la cosse centrale de l'interrupteur de gauche.

Après avoir connecté la pile, faites basculer les interrupteurs. Que constatez-vous ?

Si la LED est allumée, en basculant l'un ou l'autre des interrupteurs, elle s'éteindra. Si elle est éteinte, n'importe lequel des interrupteurs provoquera son allumage. Avant de vous expliquer ce comportement intéressant (voir la section « Dessiner un schéma » page 55), je dois aborder quelques notions fondamentales et historiques.

Fondamentaux : tout sur les interrupteurs

Dans l'expérience 6, lorsque vous basculez le bouton de l'interrupteur avec vos doigts, il connecte la borne centrale avec l'une des bornes externes (figure 2-27).

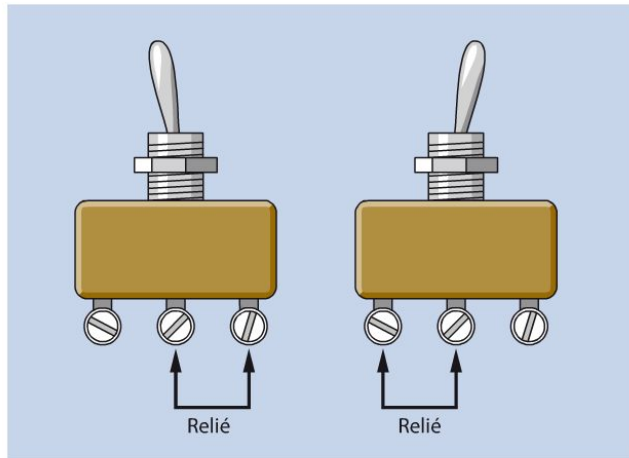


Figure 2-27. Habituellement, mais pas obligatoirement, les interrupteurs fonctionnent de cette façon.

La cosse centrale est appelée le pôle de l'interrupteur. Comme vous pouvez basculer le levier vers l'avant ou vers l'arrière, ce composant est appelé interrupteur à deux positions ou inverseur (ou *double-throw* en anglais, abrégé DT ou parfois 2T.) Un interrupteur unipolaire à deux positions est noté SPDT (ou parfois 1P2T).

Certains interrupteurs ne possèdent que deux cosses au lieu de trois. Ce sont des interrupteurs « tout ou rien » : dans un sens, il y a contact (circuit fermé), dans l'autre sens, il n'y a aucun contact (circuit ouvert). Les interrupteurs des luminaires de votre domicile fonctionnent généralement de cette façon. Ils sont dits unipolaires non inverseurs (*single-throw* en anglais). Un interrupteur unipolaire est noté SPST (ou parfois 1P1T).

Certains interrupteurs possèdent deux pôles électrique-ment distincts, que vous pouvez alors utiliser pour réaliser deux connexions simultanées lorsque vous basculez l'interrupteur. Ils sont appelés bipolaires, notés DP (ou parfois 2P). Consultez les figures 2-28, 2-29 et 2-30 où

sont représentés des interrupteurs de style ancien dits à « lames ». En pratique, vous n'utiliserez pas de tels interrupteurs, mais ils illustrent clairement les différences entre les interrupteurs SPST, SPDT et DPST.



Figure 2-28. Un interrupteur unipolaire non inverseur (SPST), fabriqué pour les besoins de l'enseignement.



Figure 2-29. Inverseur unipolaire (SPDT) reliant un pôle à deux contacts.



Figure 2-30. Interrupteur bipolaire non inverseur possédant deux pôles totalement isolés l'un de l'autre. Chaque pôle peut fermer un seul contact.

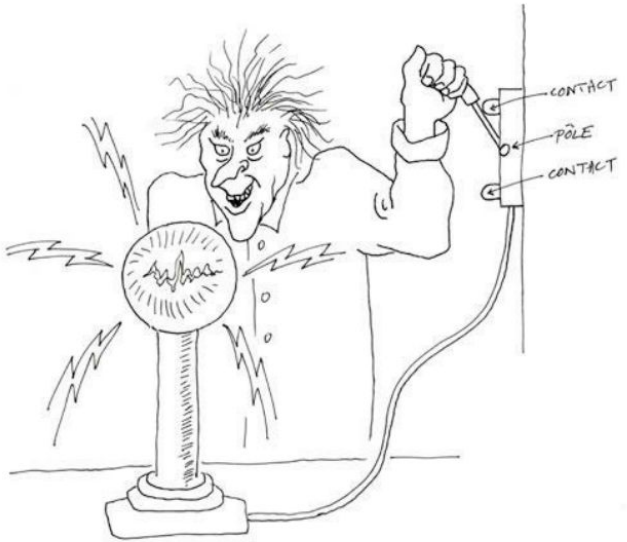


Figure 2-31. Ce savant fou alimente en électricité son expérience à l'aide d'un interrupteur à lame SPDT installé sur le mur de son laboratoire.

Afin de rendre les choses plus intéressantes, vous pouvez vous procurer des interrupteurs avec trois ou quatre pôles. Certains commutateurs rotatifs en ont parfois davantage, mais je ne les utiliserai pas. De même, certains inverseurs bipolaires ont une position intermédiaire « neutre ».

Le tableau ci-après vous offre un récapitulatif (figure 2-32) des différents types d'interrupteurs et leurs abréviations. Les boutons-poussoir utilisent les mêmes abréviations. Si vous parcourez un catalogue de pièces détachées, vous pourrez consulter ce tableau pour vous remémorer la signification des abréviations.

	Unipolaire	Bipolaire	Tripolaire	Quadri-polaire
Uni-directionnel	SPST (ou 1P1T) on-off	DPST (ou 2P1T) on-off	3PST (ou 3P1T) on-off	4PST (ou 4P1T) on-off
Bidirectionnel ou inverseur	SPDT (ou 1P2T) on-on	DPDT (ou 2P2T) on-on	3PDT (ou 3P2T) on-on	4PDT (ou 4P2T) on-on,
Bidirectionnel à position neutre	SPDT (ou 1P2T) off-on	DPDT (ou 2P2T) on-off-on	3PDT (ou 3P2T) on-off-on	4PDT (ou 4P2T) on-off-on

Figure 2-32. Ce tableau récapitule les différents modèles d'interrupteurs à levier ou boutons-poussoir.

Certains interrupteurs possèdent un ressort de rappel qui les fait revenir à leur position de repos, quand on cesse de les actionner. Quand vous voyez ON ou OFF (ou parfois 0/I) entre parenthèses, cela signifie que vous devez maintenir la pression sur l'interrupteur pour le conserver dans cet état.

En voici quelques exemples.

OFF-(ON) : ON est l'état momentané. Il s'agit d'un interrupteur unipolaire qui établit le contact uniquement lorsqu'on appuie dessus et revient à son état initial OFF, quand on le relâche. C'est un interrupteur momentané normalement ouvert, noté NO. Les boutons-poussoir fonctionnent généralement de cette façon.

ON-(OFF) : à l'inverse, ce type d'interrupteur momentané est normalement fermé (ON) au repos. Lorsqu'on appuie dessus, son contact est ouvert. Ainsi, l'état OFF est temporaire. Il s'agit d'un interrupteur momentané normalement fermé noté NF (ou NC en anglais).

(ON)-OFF-(ON) : interrupteur à position neutre. Quand on le pousse dans une direction ou l'autre, il établit un contact momentanément et revient à sa position centrale quand on le relâche.

Il existe d'autres variantes, telles que ON-OFF (ON) ou ON-(ON). Vous devriez être à même d'en déterminer le comportement en vous rappelant que l'état entre parenthèses est momentané.

Étincelles

Toute création ou interruption d'une connexion électrique produit une étincelle, néfaste pour les contacts de l'interrupteur. Ils s'usent jusqu'à ce que l'interrupteur ne puisse plus établir une connexion fiable. Aussi est-il important d'utiliser un interrupteur adapté à la tension et à l'intensité du circuit.

Les circuits électroniques de ce livre sont à faible courant et à faible tension ; n'importe quel interrupteur est adapté. En revanche, si vous souhaitez mettre en marche un moteur, il nécessitera au démarrage une surintensité initiale au minimum deux fois supérieure à celle requise durant son fonctionnement permanent. Il faudra probablement opter pour un interrupteur 4 A pour mettre en marche et arrêter un moteur 2 A.

Vérifier un interrupteur

Utilisez votre multimètre pour vérifier un interrupteur. Vous déterminerez ainsi les contacts qui sont établis lorsque vous le manipulez dans un sens ou dans l'autre. C'est également de cette façon que vous déterminerez si un bouton-poussoir est de type NO ou NF. Vous devez régler votre multimètre pour la vérification de « continuité » L'appareil émettra un signal sonore (ou une indication visuelle) lorsque le contact sera établi (figures 2-33, 2-34 et 2-35).

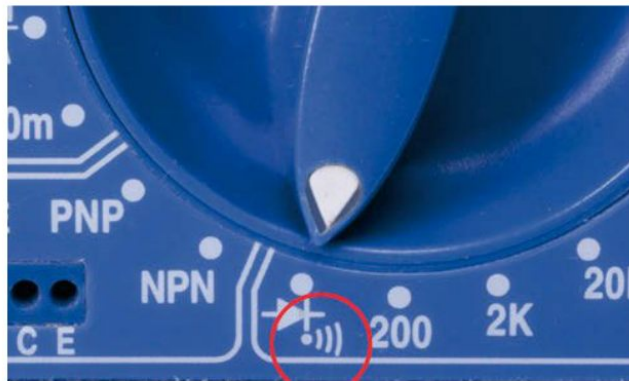


Figure 2-33. Multimètre dont le contacteur rotatif est positionné pour la vérification de continuité.



Figure 2-34. Autre multimètre réglé pour la vérification de continuité.

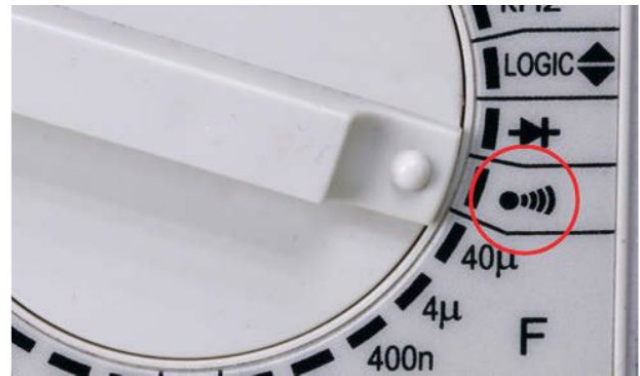


Figure 2-35. Troisième exemple de multimètre vérifiant une continuité.

Historique : les premiers interrupteurs

Les interrupteurs font partie intégrante de notre quotidien. Même si leur concept est simple, ils n'en ont pas moins suivi un processus de développement permanent et de perfectionnement. Les premiers interrupteurs à lames convenaient aux pionniers de l'électricité qui voulaient simplement établir ou interrompre la liaison électrique avec un de leurs appareils de laboratoire. Toutefois, une approche plus élaborée s'imposa quand les systèmes téléphoniques commencèrent à proliférer. Comment l'opérateur d'un standard téléphonique pouvait-il connecter n'importe quelle paire des 10 000 lignes de son pupitre ?

En 1878, Charles E. Scribner (figure 2-36) mit au point l'interrupteur à lame, ainsi nommé car l'opérateur le tenait comme le manche d'un canif. Une fiche dépassait de l'interrupteur qui, une fois insérée dans une prise, établissait le contact à l'intérieur de cette dernière. C'est donc la prise qui constituait l'interrupteur.



Figure 2-36. En 1878, Charles E. Scribner invente l'interrupteur à lame (jack-knife switch) pour les besoins des standards téléphoniques de l'époque.

Les connecteurs audio des guitares et des amplificateurs actuels fonctionnent selon le même principe. On les désigne par le terme « *jack* », en référence à l'invention de Scribner.

De nos jours, les standards téléphoniques sont devenus aussi rares que les opérateurs, remplacés d'abord par les relais (des interrupteurs commandés électriquement, voir plus loin dans ce chapitre). Puis les relais ont eux-mêmes cédé leur place aux transistors, qui contrôlent le courant sans qu'il y ait besoin d'établir un contact (voir expérience 10).

Compréhension des schémas

Afin de faciliter la compréhension des connexions, tous les circuits seront dorénavant illustrés par des schémas. Quelques symboles conventionnels sont à connaître pour pouvoir les interpréter.

Les deux figures 2-26 et 2-37 montrent le même circuit avec les mêmes composants et les mêmes liaisons. Sur la figure 2-37, le symbole en forme de zigzag représente une résistance, tandis que la pile est schématisée par deux lignes parallèles de longueurs inégales, la plus longue indiquant le pôle positif. Le symbole entouré

d'un cercle est une LED, ses deux petites flèches obliques précisent qu'il s'agit d'une diode électroluminescente (les autres types de diodes seront évoqués plus loin). Le grand triangle noir de la LED indique la direction du courant selon le *sens conventionnel*, c'est-à-dire selon un flux imaginaire allant du pôle positif au pôle négatif. Enfin, les deux autres symboles sont des interrupteurs.

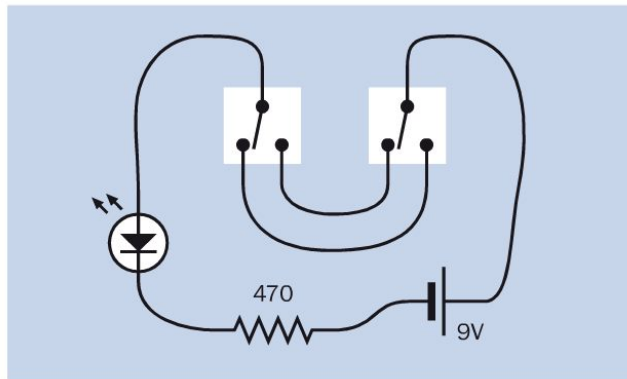


Figure 2-37. Ce schéma représente le circuit de la figure 2-26.

Suivez le chemin que le courant électrique peut emprunter dans le circuit et imaginez les interrupteurs dans une position ou dans l'autre. Vous devriez maintenant voir clairement quel interrupteur va inverser l'état de la LED.

La figure 2-38 représente le même schéma plus clairement dessiné. Les lignes sont droites et le pôle positif de l'alimentation est en haut et à gauche, le pôle négatif étant en bas et à droite. Selon les conventions, dans un schéma, le courant électrique se déplace du haut vers le bas, tandis que les signaux se déplacent de la gauche vers la droite. L'organisation du haut vers le bas d'un schéma le rend plus facile à interpréter.

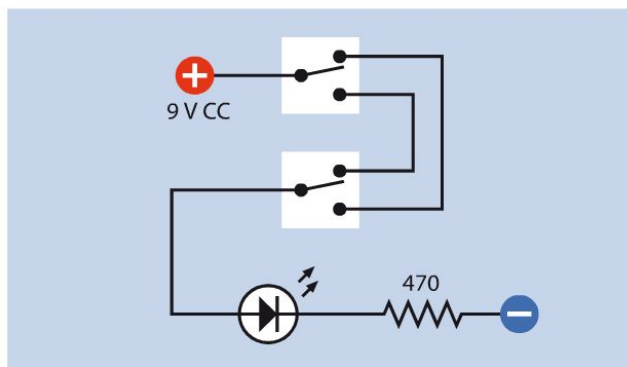


Figure 2-38. Le schéma précédent a été réorganisé avec des lignes plus conventionnelles.

Retenez que ces deux schémas représentent le même circuit, bien qu'ils paraissent différents. Le type des composants et la façon dont ils sont interconnectés sont les seules choses importantes. La place précise des composants est sans importance.

*Un schéma n'indique pas où placer les composants.
Il indique uniquement comment les interconnecter.*

Ce type de circuit est utilisé dans les habitations, par exemple quand deux interrupteurs, un en bas et en haut de l'escalier, sont utilisés pour allumer ou éteindre la même lumière. Ceci est illustré par la figure 2-39 sur laquelle la phase et le neutre de l'alimentation électrique en alternatif sont situés à gauche du dessin. Le fil de la phase est commuté alors que le fil du neutre est directement relié à la lampe (le cercle blanc contenant une ligne enroulée représente une lampe d'éclairage incandescente).

Le seul problème des schémas provient du fait que certains symboles ne sont pas standardisés. Vous pouvez en trouver plusieurs variantes qui ont toutes la même signification. Je les décrirai au fur et à mesure que nous allons progresser.

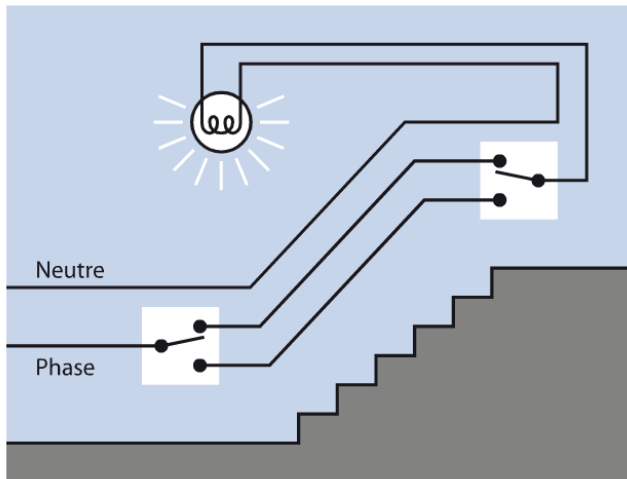


Figure 2-39. Circuit identique à celui de la figure précédente, utilisé dans les habitations où deux interrupteurs contrôlent un seul luminaire.

Fondamentaux : symboles de base en électronique

Interrupteur

L'interrupteur unipolaire unidirectionnel peut être représenté de cinq façons différentes. Dans chaque cas, le pôle est à droite et le contact à gauche – en fait, pour un interrupteur SPST, cela n'a pas de signification particulière. Dans ce livre, chaque interrupteur est dessiné dans un rectangle blanc afin de mettre en évidence qu'il s'agit bien d'un seul composant, même s'il est constitué de deux parties distinctes.

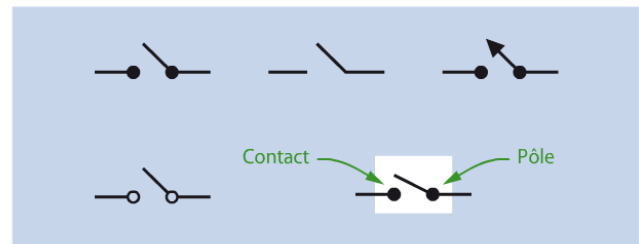


Figure 2-40. Cinq variantes du symbole d'un interrupteur unipolaire unidirectionnel. Ils sont fonctionnellement identiques.

Les choses se compliquent avec un interrupteur bipolaire bidirectionnel (figure 2-41). Une ligne pointillée indique que les deux parties de l'interrupteur sont commandées simultanément quand l'interrupteur est manipulé, mais que chaque pôle et chaque jeu de contacts sont électriquement isolés.

Dans les grands schémas, il est parfois difficile de placer les deux parties d'un tel interrupteur proches l'une de l'autre. Chaque jeu de contacts est identifié par une abréviation se terminant par A, B, C... et vous devez considérer que tous les contacts sont contenus dans un unique interrupteur.

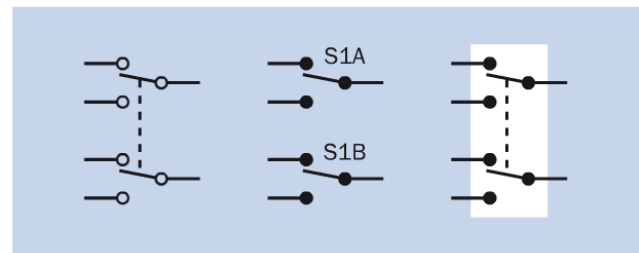


Figure 2-41. Trois variantes du symbole d'un interrupteur bipolaire bidirectionnel (DPDT).

Alimentation

L'alimentation en courant continu (CC) d'un circuit peut être représentée de différentes manières. La partie haute de la figure 2-42 montre les symboles d'une pile. La ligne la plus courte indique le pôle négatif et la plus longue indique le pôle positif. Traditionnellement, on représente une pile de 1,5 V par une seule paire de lignes, deux paires signifient qu'il s'agit d'une pile de 3 V et ainsi de suite. Toutefois, quand des circuits comprennent des tubes électroniques utilisant des tensions élevées, le dessinateur du schéma reliera par une ligne pointillée deux symboles élémentaires, au lieu d'en représenter des douzaines.

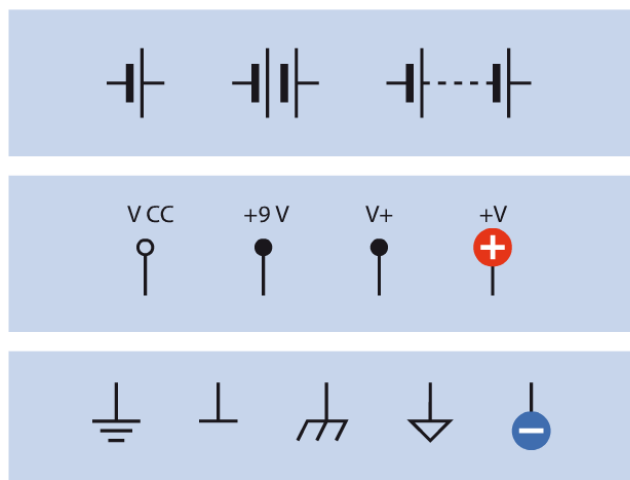


Figure 2-42. Les différentes façons de représenter une alimentation à courant continu.

Le symbole d'une pile peut être utilisé dans un schéma simple. Plus souvent, les pôles positif et négatif d'une pile sont représentés par des symboles séparés (au centre et en bas de la figure 2-42). Le pôle positif est représenté dans une partie du circuit et identifié par V_{CC} , V_{CC} , $V+$, $+V$ ou $+V$ suivi d'un nombre indiquant la tension.

À l'origine, le terme V_c se référait à la tension du collecteur d'un transistor ; V_{CC} signifiant la tension d'alimentation de l'ensemble du circuit, c'est ce qu'on utilise le plus couramment maintenant, que le circuit comporte des transistors ou non. Dans ce livre, j'ai utilisé le signe plus dans un cercle rouge pour indiquer le pôle positif de l'alimentation.

Le pôle négatif peut être représenté par les symboles de la partie basse de la figure 2-42. On le nomme pôle négatif, masse ou terre. Comme plusieurs parties d'un schéma doivent se partager le potentiel de la masse, des symboles différents peuvent se trouver disséminés dans le schéma.

Dans ce livre, c'est le signe moins dans un cercle bleu, qui est utilisé.

Cette présentation vaut pour un circuit alimenté par une pile. Dans un montage utilisant le courant alternatif du secteur, la situation se complique du fait que la prise de courant comporte trois broches, pour les connexions de la phase, du neutre et de la terre.

Un schéma identifie une source de courant alternatif par une forme en S tournée sur le côté (figure 2-43). La valeur de la tension d'alimentation est indiquée ; en France, c'est habituellement 220 V. La partie droite de la figure 2-43 se réfère au châssis de l'appareil dans lequel le circuit électronique est installé et qui est relié à la terre.



Figure 2-43. Symboles représentant une alimentation en courant alternatif (à gauche) et le châssis d'un appareil relié au secteur alternatif.

La broche de terre d'une prise de courant est réellement connectée au sol, à l'extérieur du bâtiment. Un appareil électronique comportant un châssis métallique relié à cette connexion est dit « mis à la terre ». Un circuit alimenté par une pile de faible tension ne nécessite pas cette précaution, mais on représente quand-même ce symbole.

Résistance

Il n'existe que deux variantes du symbole de la résistance : celle utilisée aux États-Unis et l'euro-péenne (figure 2-44). La résistance peut également être identifiée par un repère comme R_1 , R_2 , R_3 ... et une liste séparée indiquant les valeurs.



Figure 2-44. Symbole d'une résistance de 220 Ω aux États-Unis (à gauche) et en Europe (à droite).

En Europe, la virgule est remplacée par la lettre K ou M et pour les valeurs inférieures à 1K, les chiffres sont suivis de la lettre R.

Potentiomètre

La figure 2-45 montre les symboles en usage aux États-Unis et en Europe. Dans les deux cas, la flèche indique le curseur du potentiomètre. La valeur de la résistance est précisée au centre de l'élément.



Figure 2-45. Le symbole de gauche représente un potentiomètre aux États-Unis, celui de droite est utilisé en Europe.

Bouton-poussoir

Il existe trois symboles différents pour un bouton-poussoir (figure 2-46). Ils représentent le type le plus usuel, normalement en position ouverte, une pression provoque la fermeture du contact. Pour des boutons-poussoir plus sophistiqués dans lesquels un seul bouton établit ou interrompt plusieurs contacts, le symbole d'un interrupteur multipolaire peut être utilisé.

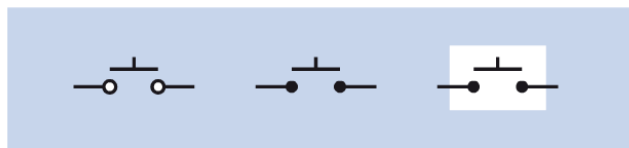


Figure 2-46. Trois variantes du symbole utilisé pour un bouton-poussoir. Le rectangle blanc est ajouté dans ce livre pour plus de clarté.

Diode (LED)

La figure 2-47 montre quatre variantes du symbole de la LED. La signification reste identique, avec un cercle ou non et que le triangle soit rempli ou non. Le cercle blanc est ajouté dans ce livre pour plus de clarté. Les symboles de la LED peuvent être orientés dans n'importe quelle direction pour la simplification d'un schéma de circuit. Les flèches parallèles qui symbolisent la lumière émise peuvent également pointer dans n'importe quelle direction.

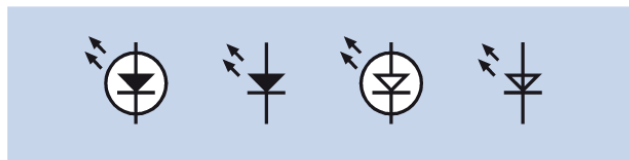


Figure 2-47. Quatre façons différentes de représenter une diode, fonctionnellement identiques.

Je présenterai d'autres variantes de symboles par la suite. Pour l'instant, les informations à retenir sont les suivantes :

- La position des composants dans un schéma ne modifie pas leurs fonctions.
- Le style des symboles utilisés dans un schéma n'est pas important.
- Les liaisons entre les composants sont extrêmement importantes.

Dessiner un schéma

Comme je l'ai déjà indiqué, le pôle positif de l'alimentation se trouve en haut et le pôle négatif en bas. Cette convention est très utile pour la compréhension du fonctionnement d'un circuit. En revanche, pour réaliser votre propre circuit, vous allez probablement utiliser une plaque de montage qui impose une géométrie totalement différente.

La plupart des livres d'électronique considèrent qu'un circuit sera modifié entre sa représentation schématique et sa disposition sur une plaque de montage. Dans ce livre, les schémas sont dessinés selon une représentation similaire à celle d'une plaque de montage. Cela sera plus clair quand vous devrez utiliser une telle plaque (expérience 8).

Les croisements

Dans le circuit très simple que vous avez déjà réalisé, il n'y avait aucun croisement, mais, quand les circuits vont se compliquer, les fils devront se croiser sans pour autant créer des liaisons. Comment cela se traduit-il en représentation schématique ?

Dans la première édition de ce livre, j'ai utilisé un style dans lequel, lorsqu'un fil croisait un autre, un petit « pont » semi-circulaire était dessiné. C'est ce qui est noté par « ancienne forme » dans la figure 2-48. Je préfère toujours ce style, car on peut très clairement voir que les fils ne sont pas reliés électriquement. Cependant cette représentation a posé quelques problèmes quand les schémas ont commencé à être créés à l'aide de logiciels graphiques plutôt qu'avec un crayon et du papier. À partir de cette époque, les pontages ont été de moins en moins utilisés.

La « nouvelle forme » de la figure 2-48 montre une des connexions interrompue. Ce style prêtait à confusion et n'était pas facilement traité par les logiciels de dessin automatique. Par conséquent, il a également été abandonné.

Le troisième style, nommé « conventionnel », est maintenant très utilisé. Dans cette édition de *L'électronique en pratique*, j'ai décidé de me conformer à ce style qui est utilisé partout dans le monde, même si je pense qu'il n'est pas aussi clair que l'ancien style.

Mais alors comment représenter deux lignes qui se croisent et qui doivent être interconnectées ? La solution consiste à utiliser un point de la grosseur d'une tête d'épingle (partie basse de la figure 2-48). Ceci correspond à la règle générale suivante :

- Deux lignes se croisant n'indiquent pas une connexion électrique.
- Quand deux lignes se croisent sous un point, elles sont interconnectées.

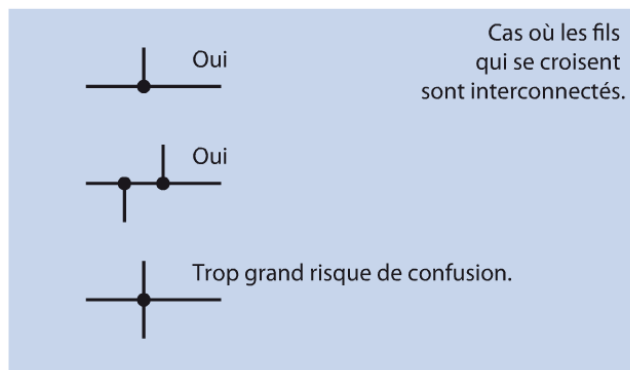
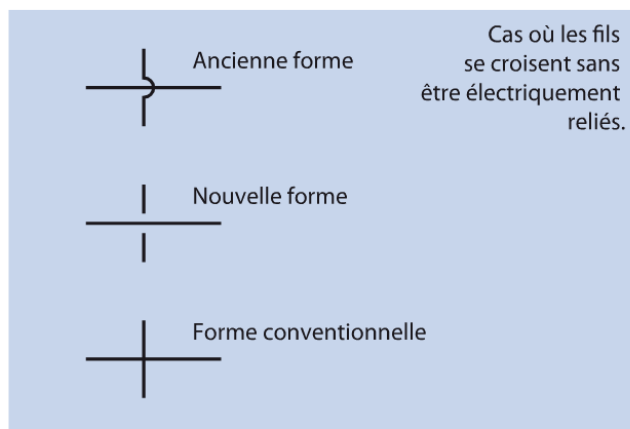


Figure 2-48. Les différents styles de représentation de lignes qui sont ou non interconnectées. Voir le texte pour plus d'explications.

Par souci de clarté, il est bon d'éviter le dernier style de la figure 2-48, qui est trop sujet à confusion. Si vous utilisez plutôt celle qui est juste au-dessus, on comprend sans ambiguïté que les fils se croisent, mais ne sont pas interconnectés.

La couleur des liaisons

Il subsiste encore un petit problème. Vous ne devez pas confondre le pôle négatif et le pôle positif de l'alimentation, c'est pourquoi toutes les connexions au pôle positif seront colorées en rouge dans les schémas de ce livre, les liaisons avec le pôle négatif seront en bleu.

Le noir est la couleur la plus utilisée pour le pôle négatif/masse (comme le fil de votre multimètre, ou le fil noir du connecteur d'une pile). Le bleu peut être parfois utilisé, ce qui est plus facilement reconnaissable.

Gardez simplement à l'esprit que les schémas que vous trouverez hors de ce livre n'utilisent pas cette convention pourtant très utile. Tous les fils seront noirs et vous devrez identifier ceux qui sont reliés à l'alimentation.

Expérience 7 : étude d'un relais

Un système de « commutateur à distance » permet d'établir ou d'ouvrir un contact en réponse à un signal qui lui est fourni. Ce type de commutateur est appelé *relais*, car l'information est relayée d'une partie d'un circuit à une autre.

Un relais est souvent contrôlé par un signal de faible tension ou de faible courant et contrôle une tension ou un courant plus élevé. C'est très pratique. Par exemple, lorsque vous démarrez votre voiture, un petit interrupteur envoie un signal de faible intensité à travers un fil de petite section, jusqu'à un relais situé près du démarreur. Le relais active le démarreur à travers un câble plus court mais de forte section – et bien plus coûteux – pouvant conduire une intensité atteignant 100 A.

De façon comparable, lorsque vous ouvrez le couvercle d'un ancien lave-linge durant le cycle d'essorage, vous fermez le contact d'un interrupteur qui transmet à un relais un signal de faible intensité, par un fil de petite section. Ce relais est alors chargé de couper l'alimentation beaucoup plus puissante du moteur qui entraîne la rotation du tambour rempli de vêtements humides.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V
- 1 ou 2 relais DPDT de 9 V CC

- 1 interrupteur tactile SPST
- 5 fils de test possédant des pinces crocodiles à leurs extrémités
- 1 couteau de bricolage ou un cutter
- 1 multimètre

Le relais

Le relais de cette expérience doit posséder deux broches d'un côté et six de l'autre. Les six broches sont organisées en deux rangées de trois (figure 2-49, le relais est renversé, avec les broches au-dessus). Si vous achetez deux relais, vous pouvez en ouvrir un avec précaution pour étudier comment il est fait à l'intérieur.

Attention à la polarité

Certains relais sont sensibles à la façon dont la tension de commande est appliquée à leur bobine : tout fonctionne correctement lorsque le courant circule dans un certain sens, mais si vous changez le sens du courant – en d'autres termes, si vous inversez la polarité – le relais ne fonctionne plus.

C'est particulièrement ennuyeux quand la fiche technique du relais ne le précise pas clairement. Les relais que je vous ai recommandés n'exigent pas le respect d'une polarité spécifique (voir la section « Essentiel : relais » page 45).

Procédure

Reliez les fils de test et le bouton-poussoir, comme indiqué sur la figure 2-49 (notez que les composants ne sont pas représentés à l'échelle). En appuyant sur le bouton-poussoir, vous appliquez une tension de 9 V aux broches séparées du groupe de six ; vous devriez alors entendre un petit clic. Relâchez le bouton ; vous devriez alors entendre un autre clic. Si vous n'entendez rien, touchez le relais du bout des doigts ; vous devriez ressentir une faible vibration lorsque le bouton est enclenché.

Que se passe-t-il ? Votre multimètre va vous aider à comprendre. Réglez-le pour la vérification de continuité et contrôlez son fonctionnement en reliant les deux pointes de touche. S'il n'émet pas de signal sonore, c'est qu'il n'est pas correctement réglé, ou que sa pile est usagée, ou peut-être qu'un de fils de mesure n'est pas relié au bon connecteur.

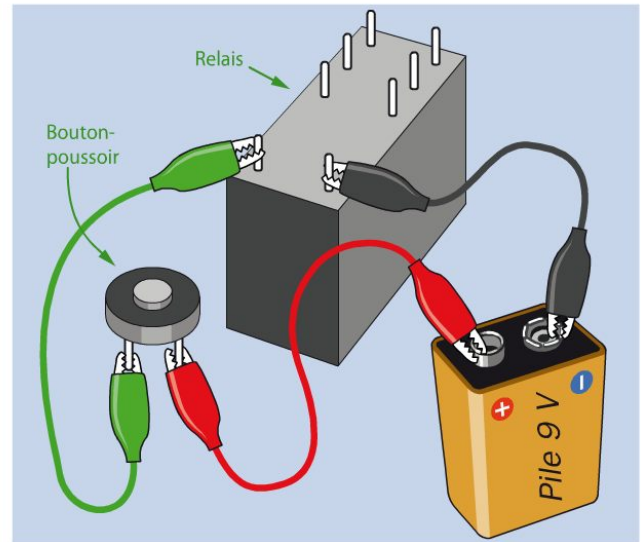


Figure 2-49. Première étape : disposez les cordons de raccordement entre les différents éléments pour étudier le comportement interne d'un relais.

Maintenant, reliez les pointes de mesure aux broches (figure 2-50) et appuyez sur le bouton-poussoir. Le multimètre devrait alors bipper.

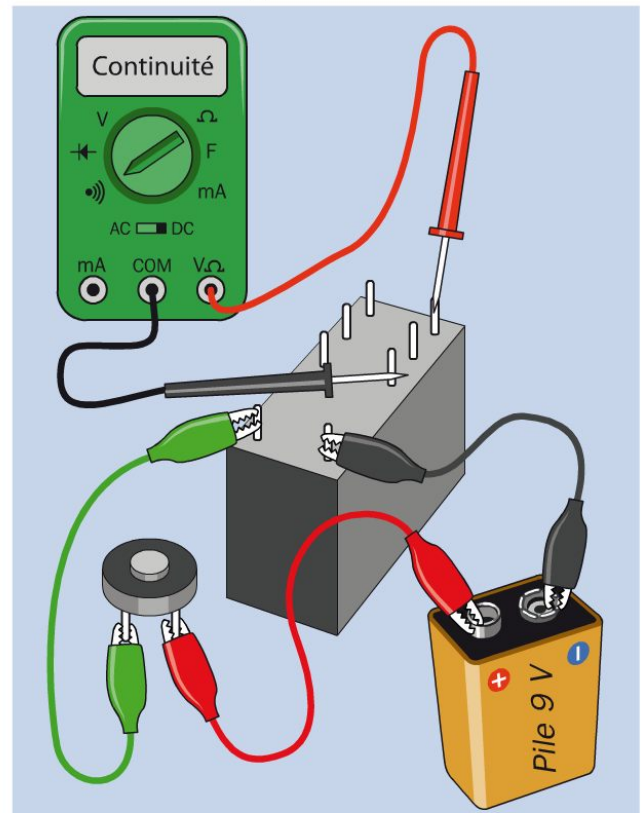


Figure 2-50. Deuxième étape : vérifiez la continuité.

Ce test vous indique que certains contacts ont été fermés dans le relais, lorsque la tension est appliquée aux deux bornes les plus proches de vous. Si vous rencontrez des difficultés pour tenir les fils de mesure en contact avec les broches du relais, tout en devant appuyer sur le bouton-poussoir, vous pouvez utiliser une paire de fils de test (figure 2-51).

Déplacez maintenant le fil rouge relié à la cosse du relais la plus éloignée vers la cosse suivante, plus proche de vous. Vous devriez alors constater que le comportement du relais est inversé : le signal sonore est émis lorsque vous n'appuyez pas sur le bouton-poussoir.

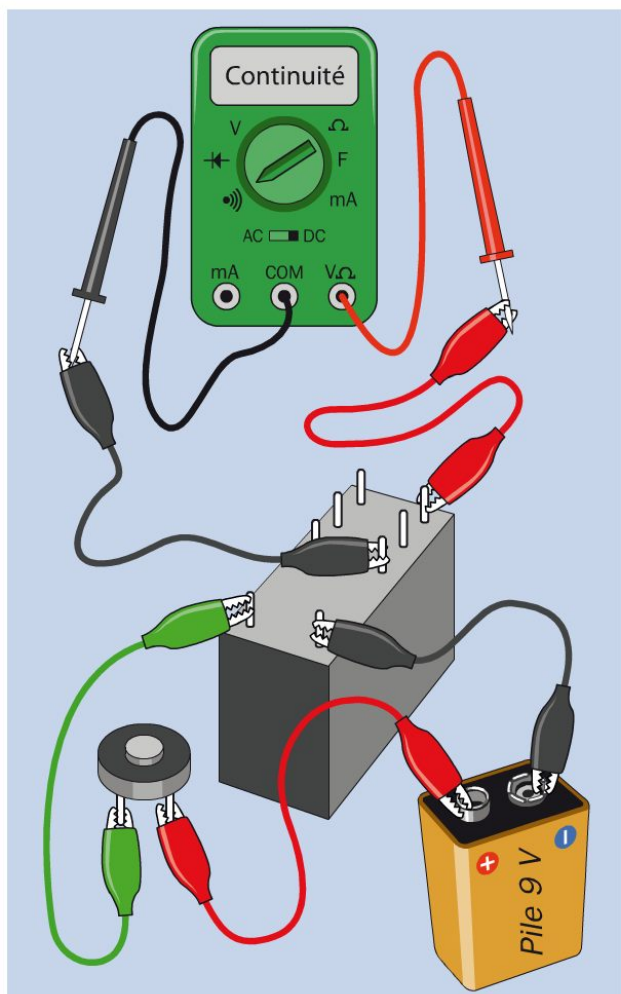


Figure 2-51. Vous pouvez allonger vos cordons de mesure à l'aide de fils de test.

À l'intérieur d'un relais

La figure 2-52 montre une vue en transparence de l'intérieur du relais, lorsque vous appuyez sur le bouton-poussoir. Le relais contient une bobine, située en bas, qui génère un champ magnétique déplaçant un couple de contacts inverseurs. La bobine a déplacé le contact interne de droite reliant ainsi les broches A et C ; le multimètre a donc émis un bip.

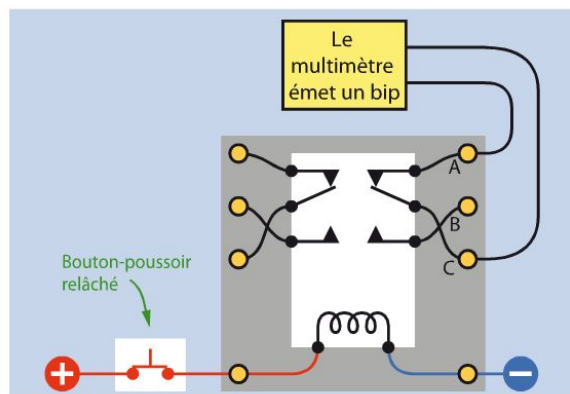


Figure 2-52. Schéma de l'intérieur du relais. Lorsque le poussoir est enfoncé, le multimètre émet un bip.

La bobine du relais semble repousser le contact interne, ce comportement est dû à la présence d'une liaison mécanique interne qui convertit la force d'attraction en force de répulsion. Vous pourrez l'observer lorsque vous allez ouvrir le relais, un peu plus loin dans cette expérience.

La figure 2-53 montre ce qui se passe lorsque vous n'appuyez pas sur le poussoir. Les contacts du relais reviennent à leur position initiale, interrompant la connexion entre A et C pour l'établir entre B et C. Le contact reste dans cette position lorsqu'aucun courant ne traverse la bobine du relais.

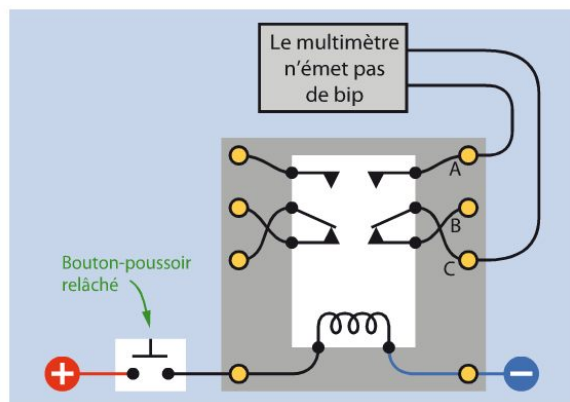


Figure 2-53. Vue intérieure du relais lorsque le poussoir est relâché. Le multimètre n'émet plus de signal sonore.

Autres relais

Le brochage décrit est le plus commun pour les relais de cette taille. Il existe cependant quelques exceptions qui se présentent différemment.

Lorsque vous utilisez un relais bipolaire bidirectionnel (DPDT), comment déterminer ce qui se passe à l'intérieur ? Vous devez, pour cela, contrôler les différentes broches de votre relais à l'aide du multimètre, en appliquant une tension adéquate à sa bobine. En procédant par élimination, vous devriez pouvoir déterminer la fonction de chacune des broches.

La fiche technique du fabricant devrait inclure un plan similaire à celui de la figure 2-21.

Le sujet des relais est bien plus vaste que ce que nous venons d'aborder.

- Les relais à *verrouillage* ont des contacts internes qui restent dans une position ou dans l'autre, quand la tension n'est plus appliquée sur la bobine. Les relais à verrouillage ont habituellement *deux bobines* afin de déplacer les contacts dans chaque position. Je n'en utiliserai pas dans ce livre.
- Certains relais possèdent deux pôles, d'autres un seul ; certains sont des inverseurs (bidirectionnels), d'autres sont unidirectionnels.
- Certaines bobines utilisent une tension alternative (CA), d'autres du courant continu (CC), ces dernières exigent que la tension qui leur est appliquée respecte une polarité précise.

Comme toujours, les fiches techniques vous apporteront toutes les informations dont vous avez besoin.

La figure 2-54 montre une sélection de symboles pour différentes sortes de relais. Le type A est unipolaire, unidirectionnel (SPST). Le type B est unipolaire inverseur (SPDT). Le type C est unipolaire, unidirectionnel, mais représenté selon le style que je préfère employer, avec un rectangle rappelant que tous les constituants du relais sont enfermés dans un seul boîtier. Le type D est unipolaire, bidirectionnel (inverseur). Le type E est bipolaire, bidirectionnel. Le type F est unipolaire, bidirectionnel à verrouillage.

Les symboles des relais sont toujours représentés avec leurs contacts internes en position de repos, la tension de commande ne leur étant pas appliquée – à l'exception des relais à verrouillage pour lesquels la position des contacts est arbitrairement choisie.

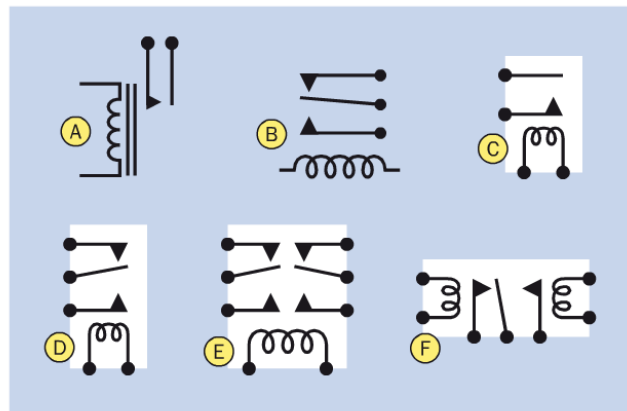


Figure 2-54. Les différentes manières de représenter un relais.

Le type de relais que vous avez testé est de *faible puissance*, ce qui signifie qu'il ne peut pas commuter une forte intensité. Des relais plus puissants peuvent couper des intensités de plusieurs ampères. Il est important de choisir un relais dimensionné pour couper l'intensité maximale de votre circuit (ou davantage), car la surcharge d'un relais provoquerait des étincelles qui pourraient détériorer rapidement ses contacts.

Dans les expériences suivantes, vous découvrirez quelques usages pratiques des relais – par exemple, dans un système d'alarme domestique. Avant cela, je vais vous montrer comment transformer un relais en oscillateur émettant un bruit de buzzer.

Ouverture du relais

Vous pouvez ouvrir votre relais de différentes façons (figures 2-55 ou 2-56), il est cependant préférable d'utiliser les outils plus appropriés : un cutter ou un couteau de bricolage.



Figure 2-55. Première méthode pour ouvrir un relais – la moins recommandée.



Figure 2-56. Deuxième méthode – à bannir définitivement !

Les figures 2-57 et 2-58 illustrent la technique que je préconise : découpez soigneusement les angles du dessus du boîtier, jusqu'à ce qu'apparaisse une fente légèrement plus épaisse qu'un cheveu, sans aller au-delà car les composants internes sont très proches de la lame du

cutter. Retirez alors le dessus du boîtier en répétant cette procédure pour chacune de ses arêtes. Si vous prenez assez de précautions, l'intérieur du relais sera visible et il continuera à fonctionner, si vous appliquez la tension adéquate à sa bobine.

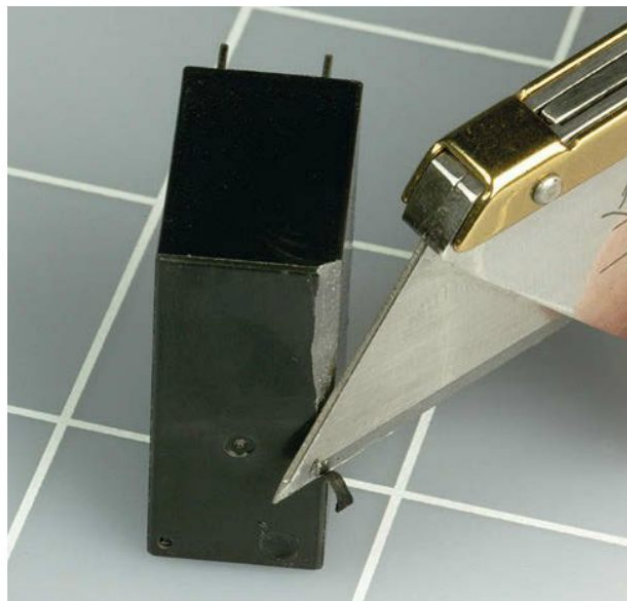


Figure 2-57. La découpe des arêtes du boîtier plastique d'un relais est la première étape à suivre pour l'ouvrir. Procédez toujours en éloignant la lame de vous, vers le bas, sur un plan de travail.

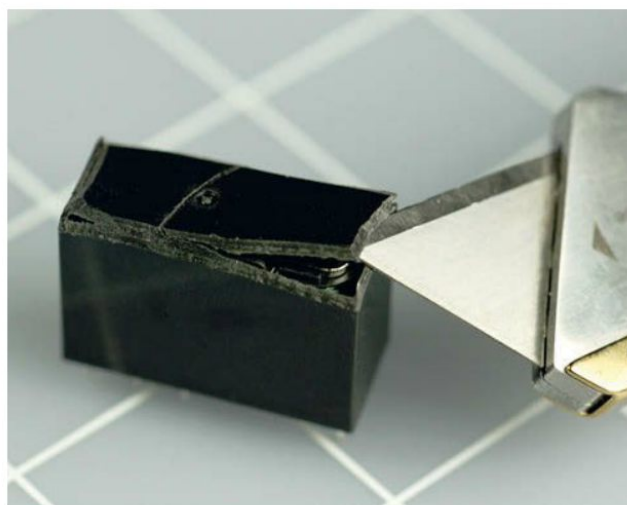


Figure 2-58. Après avoir découpé les arêtes, vous devriez pouvoir glisser la lame du cutter sous le capot pour le retirer.

Qu'y a-t-il dedans ?

La figure 2-59 est une vue simplifiée des composants internes d'un relais typique. La bobine A génère un champ magnétique qui attire la palette B vers le bas. Une pièce en plastique C pousse les lames métalliques flexibles et déplace ainsi les pôles du relais D entre les contacts. Il s'agit d'une configuration différente de celle que je vous recommande, mais le principe général est le même.

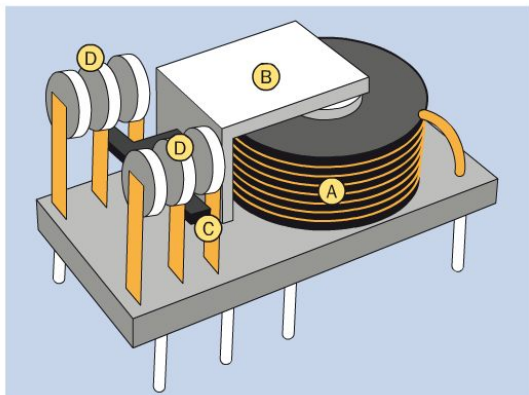


Figure 2-59. Vue interne simplifiée d'un relais ouvert.

Vous pouvez comparer ce schéma avec la photo du relais que j'ai ouvert (figure 2-60).

Des relais de différentes tailles sont présentés avec leurs capots ouverts sur la figure 2-61. Il sont tous prévus pour une tension continue de 12 volts. Le relais pour automobile situé le plus à gauche est le plus simple et son fonctionnement est plus facile à comprendre, car il a été conçu sans contrainte de taille. Les relais plus petits sont élaborés avec plus d'ingéniosité et sont plus complexes. En général, plus un relais est petit, plus le courant qu'il peut couper est faible.

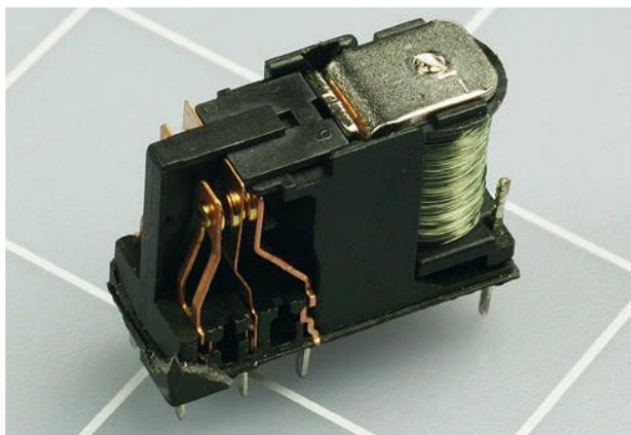


Figure 2-60. Relais ouvert. Les carrés du support mesurent 2,5 cm de côté.



Figure 2-61. Quatre relais 12 V CC de différentes tailles avec leurs capots ouverts.

Fondamentaux : terminologie propre aux relais

La *tension de bobine* (*coil voltage* en anglais) est la tension qui doit être appliquée à la bobine pour commander le fonctionnement du relais.

La *tension de commande minimale* (*set voltage*) est la tension minimale pour faire fonctionner. Elle est inférieure à la tension nominale (idéale) de la bobine. En pratique, un relais s'actionnera probablement avec une tension inférieure, mais la tension de commande minimale garantit le fonctionnement du relais.

L'*intensité de fonctionnement* (*operating current*) est l'intensité consommée par la bobine, habituellement exprimée en milliampères, parfois en milliwatts, lorsque le relais est activé.

La *capacité de commutation* (*switching capacity*) indique l'intensité maximale supportée par les contacts du relais sans être endommagés. Cette valeur est en général spécifiée pour une *charge résistive* correspondant à un composant passif, par exemple une lampe à incandescence. Si vous utilisez un relais pour commander un moteur, vous lui imposez une *charge inductive*, qui requiert une surintensité importante au démarrage, jusqu'à ce que le moteur atteigne sa pleine vitesse. L'arrêt du moteur provoque une autre surcharge. Si la fiche technique d'un relais ne mentionne pas la possibilité de contrôler une charge inductive, la règle est de considérer qu'un moteur peut consommer jusqu'au double de son intensité nominale au démarrage.

Expérience 8 : un oscillateur à relais

Progressivement vous devrez vous habituer à adopter une méthode plus rapide que celle avec les pinces crocodiles, il s'agit aussi de la plus répandue pour la réalisation de prototypes, celle qui utilise des *plaques de montage sans soudure*.

Dans les années 1940, les circuits étaient réalisés sur des sortes de planches à pain où les fils et les composants étaient cloués, agrafés ou vissés. À cette époque le plastique était peu courant et c'était plus simple que de perforer une plaque de métal.

Aujourd'hui, l'appellation planche à pain (*breadboard*) est resté chez les anglo-saxons. En France, nous utilisons le terme *plaques de montage*, qui se réfère à des petites dalles d'environ 5 × 18 cm, épaisses de moins de 2,5 cm (figure 2-10). C'est un système extrêmement pratique et rapide pour assembler des composants. Le seul problème qui subsiste, ce sont les connexions car elles ne sont pas apparentes. Pour y remédier, il existe une astuce que je détaillerai plus loin.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V
- 1 connecteur de pile
- 1 plaque de montage
- 1 relais DPDT de 9 V CC
- 2 LED génériques
- 1 interrupteur tactile SPST
- 1 résistance de 470 Ω
- 1 condensateur de 1 000 μF
- 1 pince plate, 1 pince coupante et 1 pince à dénuder
- Environ 30 cm de câblage d'au moins deux couleurs différentes

Votre premier circuit sur plaque de montage

Sur la figure 2-62, le relais est au centre, ses broches sont insérées dans la platine, on ne peut donc pas les voir. L'inverseur est en position de « repos », lorsque le relais n'est pas activé.

Le bouton-poussoir, ou interrupteur tactile est représenté sous forme de cercle gris, avec les contacts visibles, vous connaissez ainsi son orientation.

Les deux composants circulaires rouges sont les LED. Prenez garde à ce que leurs fils les plus longs soient du côté où le signe plus est indiqué.

La valeur de la résistance est de 470 Ω – vous auriez pu le déterminer en observant ses anneaux de couleurs.

Les traits rouge, vert et bleu sont des petits morceaux de fil insérés dans la plaque de montage et appelés fils de pontage.

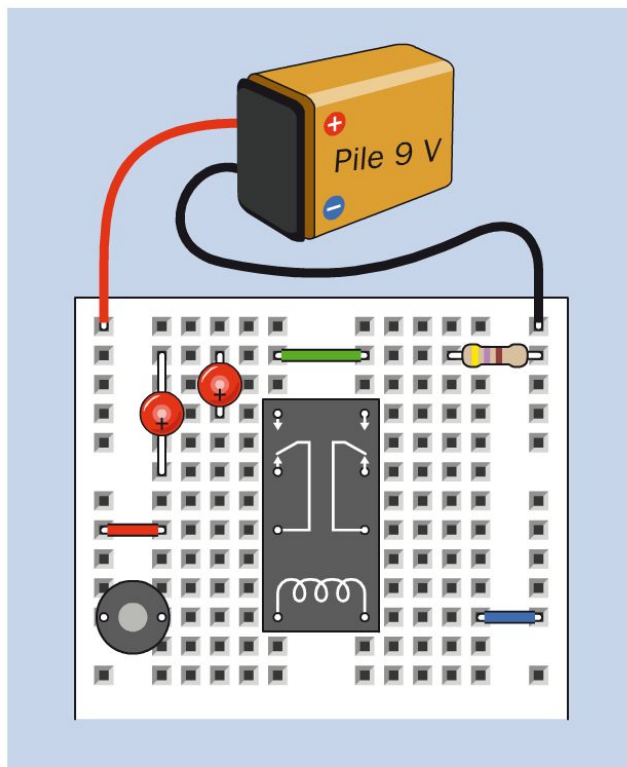


Figure 2-62. Partie supérieure de votre platine de montage avec les composants tels qu'ils doivent être insérés pour tester un relais. Les liaisons internes et la position des broches sont visibles pour comprendre l'orientation de la bobine.

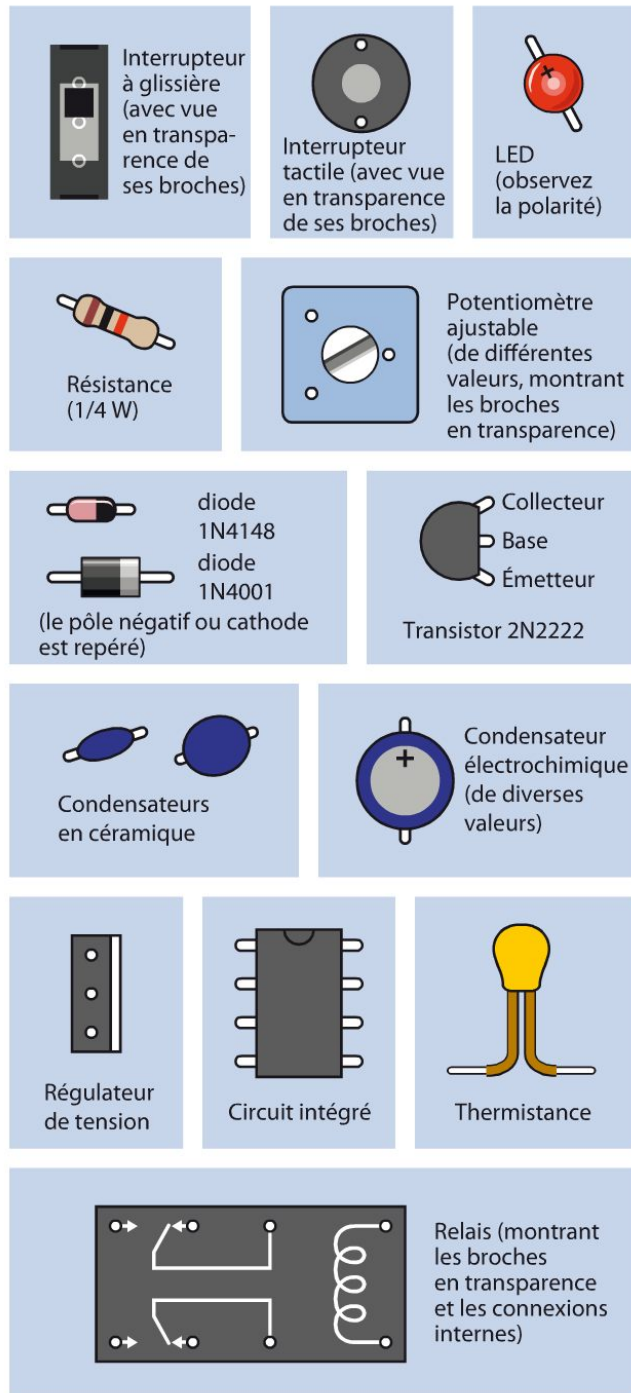


Figure 2-63. Symboles des composants que vous pourrez utiliser sur une plaque de montage.

Fabrication des fils de pontage

Si vous avez acheté un assortiment de fils de pontage prédécoupés, également appelés cavaliers, vous pouvez les utiliser en les insérant sur votre plaque selon les positions indiquées. Toutefois, ils n'auront pas forcément les mêmes couleurs que ceux de mon plan.

Il est fortement conseillé de fabriquer vos propres fils de pontage (figure 2-64). Commencez par dénuder environ 5 cm de fil de câblage. Pour y parvenir, tenez le fil dans votre main gauche (ou votre main droite, si vous êtes gaucher). Tenez la pince à dénuder de l'autre main. Refermez-la afin qu'elle enserme le fil dans le trou marqué 22 sur sa mâchoire. Éloignez-la de la main tenant le fil afin qu'elle retire la gaine isolante.

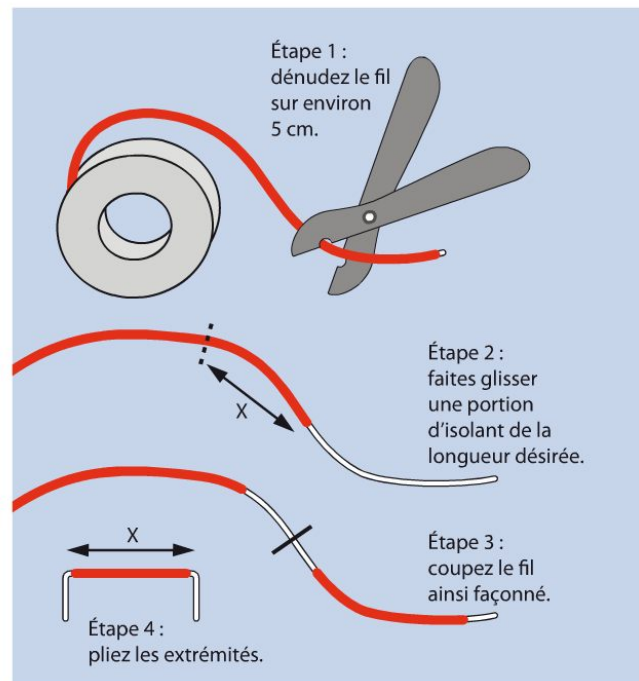


Figure 2-64. Procédure de fabrication des fils de pontage.

Vous devez ensuite déterminer la longueur visible de votre cavalier lorsqu'il sera inséré dans la platine. Appelons cette longueur X. Mesurez la longueur X de l'isolant qui devra rester sur le fil. Faites glisser cette portion d'isolant jusqu'à environ 1 cm de l'extrémité du fil.

Découpez le fil à environ 1 cm de l'extrémité de la gaine isolante que vous venez de faire glisser sur le fil, à l'aide de votre pince coupante.

Pour terminer, pliez à angle droit les extrémités dénudées du fil et insérez-le dans votre plaque. Si vous vous entraînez un peu, vous réussirez rapidement à fabriquer des fils de pontage ayant une longueur correcte, par simple estimation visuelle.

Mise sous tension

Pour terminer, vous devez relier la pile de 9 V à votre circuit. Vous devriez voir que les fils attachés à son support se terminent par une petite portion dénudée qui s'insère facilement dans la plaque de montage. Si vous avez des difficultés à les insérer, redressez-les à l'aide de votre pince plate. Si vous n'y parvenez toujours pas, essayez de les dénuder de quelques millimètres supplémentaires à l'aide de votre pince à dénuder.

Après avoir inséré les fils de son connecteur dans la platine de montage, insérez la pile dans son support (figure 2-62). Aussitôt que la plaque est alimentée, la LED de gauche doit s'allumer. En appuyant sur le bouton-poussoir, le contact à l'intérieur du relais se ferme et la LED de droite s'allumera. Bravo ! Vous venez de réaliser votre premier circuit sur une plaque de montage.

Voyons maintenant pourquoi il fonctionne ainsi.

L'intérieur de la plaque de montage

La figure 2-65 montre les barrettes en cuivre qui sont dissimulées dans la plaque. Les petits carrés indiquent l'emplacement où les fils des composants peuvent s'insérer et entrer en contact avec les barrettes internes.

Chacune des deux barrettes longues verticales est un *bus*. Ce type de bus ne transporte pas de passagers mais des électrons, les pôles positif et négatif de l'alimentation étant habituellement connectés à ces bus.

Dans ce livre, j'utilise systématiquement le bus de gauche pour le pôle positif de l'alimentation et le bus de droite pour son pôle négatif (ou la masse).

Il est important de remarquer que chaque bus est interrompu à deux endroits. La plupart des plaques de montage sont faites ainsi. Ces coupures permettent d'utiliser des tensions d'alimentation différentes dans un même circuit, à des emplacements différents. En pratique, ce n'est pas très fréquent et les coupures des bus sont ennuyeuses, car on a tendance à oublier qu'elles existent. Lorsque votre circuit occupe toute la surface de la plaque, si vous constatez une disparition de la tension d'alimentation par endroits, vous réaliserez rapidement

que vous avez oublié d'ajouter des cavaliers pour relier les différentes sections d'un bus.

Quand cela sera nécessaire, je vous rappellerai de faire attention à ce petit détail.

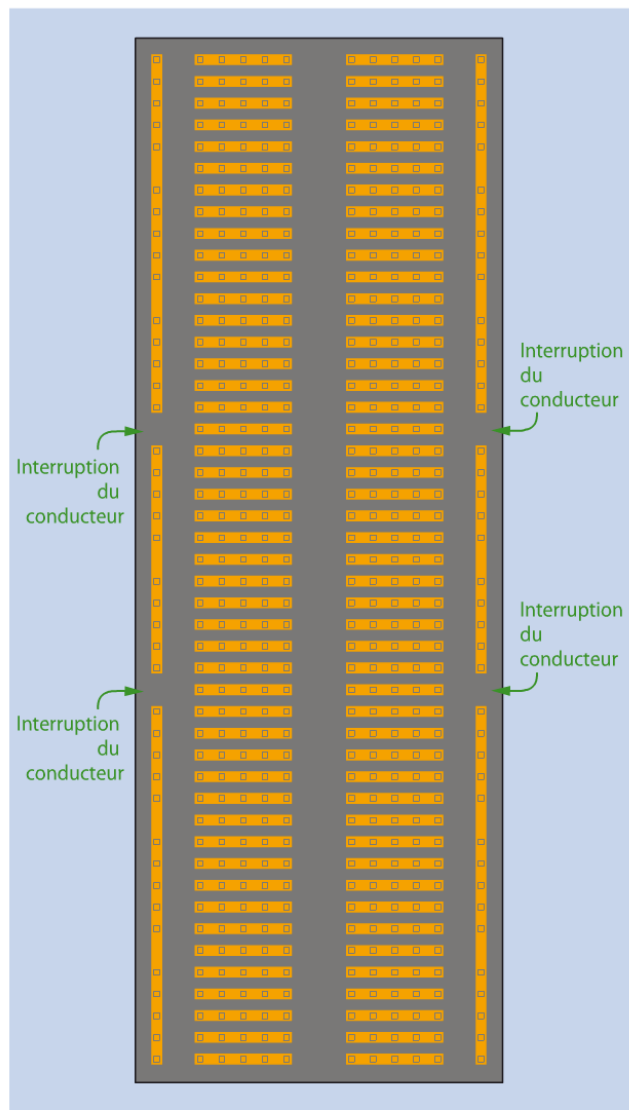


Figure 2-65. Liaisons de cuivre à l'intérieur d'une plaque de montage à bus simple.

Découvrons le circuit du relais

Les barrettes de cuivre dans votre plaque de montage établissent des connexions entre les composants insérés dans la plaque. Le courant électrique suit un chemin en zigzag, mais la résistance du cuivre est si faible que la longueur de ce chemin est sans importance.

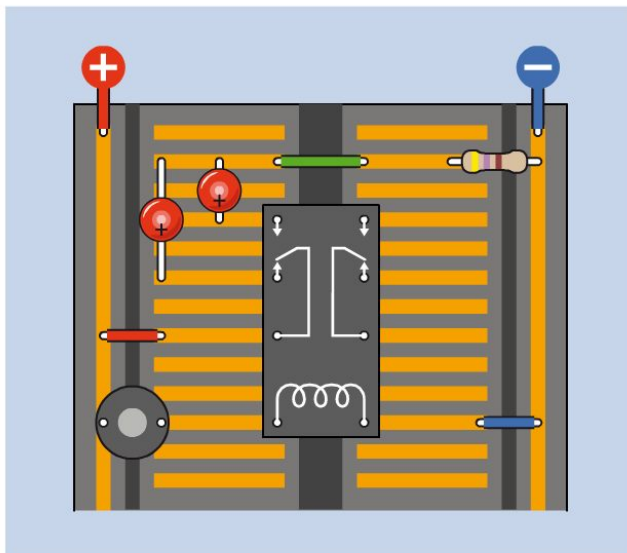


Figure 2-66. Les composants de la plaque sont interconnectés par les barrettes de cuivre internes.

Le plan sera peut-être plus facile à comprendre en faisant disparaître les barrettes de cuivre internes qui ne sont pas utilisées, pour ne montrer que celles qui font partie du circuit (figure 2-67).

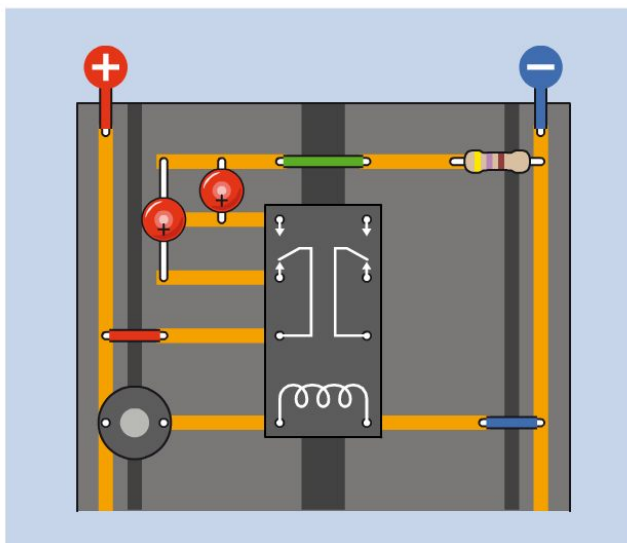


Figure 2-67. Le plan de la figure 2-66 est modifié afin que les barrettes internes inutilisées ne soient pas visibles.

Observez maintenant le schéma du même circuit (figure 2-68). Il est dessiné au plus proche du circuit que vous venez de réaliser sur la plaque de montage.

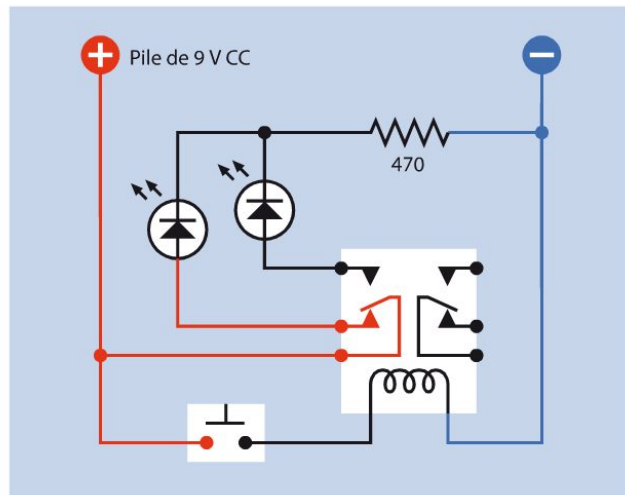


Figure 2-68. Schéma correspondant au circuit monté sur la plaque de la figure 2-66.

Il n'y a qu'une seule résistance de $470\ \Omega$ pour protéger les deux LED, parce qu'une seule LED est allumée à la fois.

Émission d'un son

Durant la prochaine étape, notre circuit va devenir plus intéressant. Observez le nouveau schéma (figure 2-69) et comparez-le à sa version précédente (figure 2-68). Pouvez-vous identifier les différences ? Dans l'ancienne version, le bouton-poussoir qui activait la bobine du relais était directement alimenté par la pile de 9 V. Dans la nouvelle version, le bouton-poussoir est alimenté par le contact inférieur du relais.

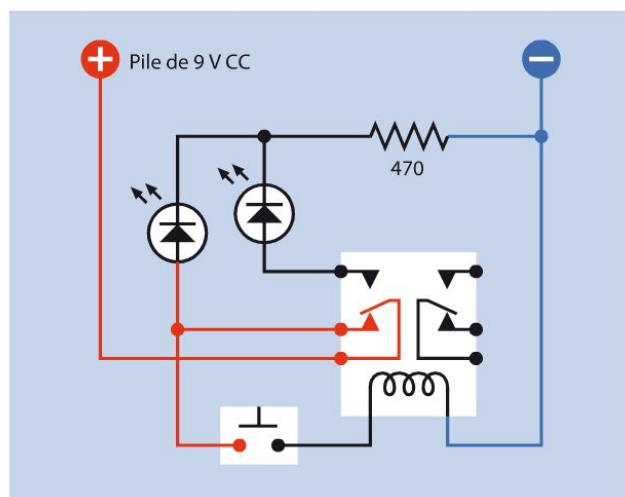


Figure 2-69. Version modifiée du schéma précédent : le bouton-poussoir est maintenant alimenté par le contact inférieur du relais.

La figure 2-70 vous montre comment modifier la version précédente du circuit sur votre plaque de montage afin qu'elle corresponde au nouveau schéma. Tournez le bouton-poussoir de 90 degrés et utilisez un cavalier supplémentaire (en vert sur le plan) pour le relier à la broche du relais qui commande la LED de gauche.

Appuyez brièvement sur le bouton-poussoir. Le relais émet alors un son de buzzer. Si vous ne l'entendez pas bien, touchez le relais pour ressentir les vibrations.

Au repos, l'inverseur à l'intérieur du relais est relié avec le contact du bas. La LED de gauche et le bouton-poussoir sont donc alimentés. En conséquence, en appuyant sur le poussoir, la bobine du relais est mise sous tension. La bobine pousse le contact de l'inverseur du relais vers le haut, ce qui coupe l'alimentation de la bobine. L'interrupteur interne retourne donc à sa position de repos. Cela excite à nouveau la bobine et le cycle se répète.

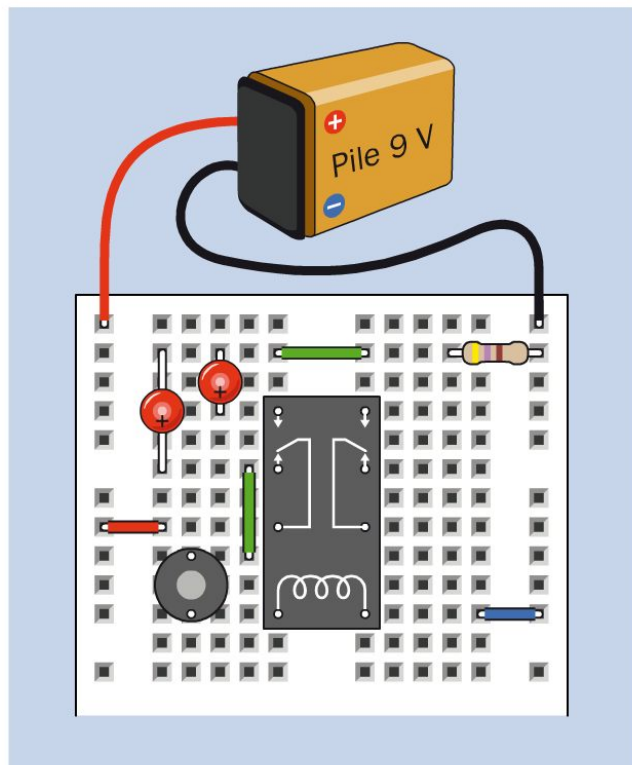


Figure 2-70. Sur la plaque de montage, le circuit de la figure 2-69 a été modifié afin de correspondre au nouveau schéma.

Le relais oscille entre ces deux états et comme il est de petite taille, il commute assez rapidement, soit environ 20 fois par seconde. C'est trop rapide pour que la LED indique ce qui se passe réellement.

En forçant un relais à se comporter de cette manière, il risque de griller ou de détruire ses contacts. L'intensité contrôlée ici est un peu plus importante que celle prévue pour votre bouton-poussoir. C'est pourquoi je vous recommande de ne pas laisser trop longtemps votre doigt appuyé ! Pour préserver votre circuit, il faut parvenir à ralentir l'oscillation, c'est ce que nous allons faire en insérant un condensateur.

Ajout d'un condensateur

Ajoutez un condensateur de 1 000 μF en parallèle avec la bobine du relais (figure 2-71), en vous assurant que son *fil le plus court* est bien relié au côté *négatif* du circuit ; dans le cas contraire, cela ne fonctionnerait pas. Un petit signe moins sur le corps du condensateur vous indique aussi le côté négatif. Dans le diagramme, j'ai utilisé le symbole plus qui est mieux visible.

Les condensateurs électrolytiques réagissent très mal s'ils sont connectés à l'envers. Ils peuvent alors s'autodétruire. Vérifiez bien leur polarité.

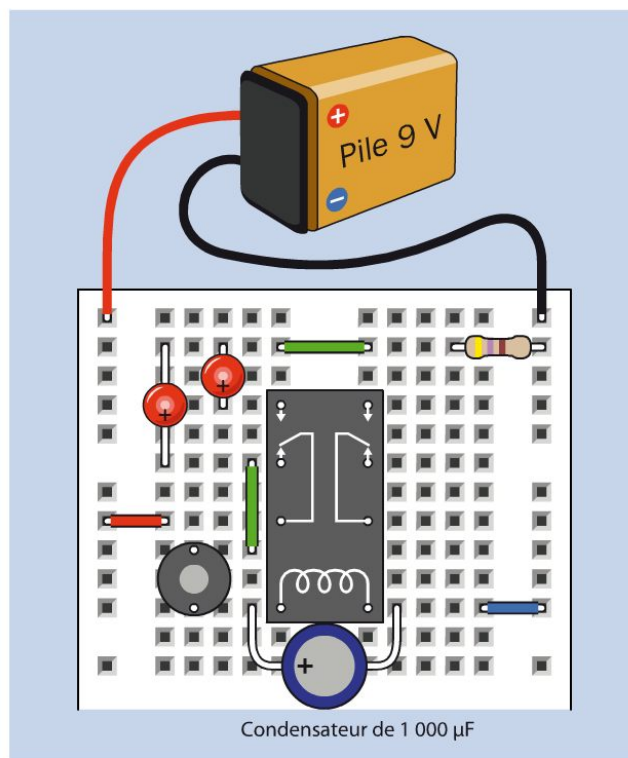


Figure 2-71. En ajoutant un condensateur de valeur importante, le circuit fonctionne au ralenti.

Lorsque vous appuyez sur le bouton-poussoir, le relais devrait cliquer de façon intermittente au lieu de vibrer.

Un condensateur est comparable à une petite pile rechargeable. Il est si petit qu'il peut se charger en une fraction de seconde, avant que le relais n'ait le temps d'ouvrir son contact du bas. Dès lors, quand les contacts sont ouverts, le condensateur restitue son énergie au relais, ainsi qu'à la LED de gauche. Cela continue à alimenter la bobine du relais pendant un court instant. Quand le condensateur est vidé de son énergie, le relais retourne à sa position de repos et ainsi de suite.

Durant ce phénomène, le condensateur se *charge* et se *décharge*.

Déconnectez la LED de droite ; vous devriez alors constater que la LED de gauche clignote de manière agréable, sa luminosité faiblissant alors que la tension aux bornes du condensateur diminue.

Le condensateur absorbant un courant élevé lorsqu'il se charge, votre interrupteur tactile pourrait surchauffer si vous le laissez appuyé trop longtemps durant cette expérience.

Fondamentaux : la capacité

La capacité de charge d'un condensateur se mesure en *farads*, représentés par la lettre majuscule F. Cette unité est ainsi nommée en hommage à Michael Faraday, un autre pionnier de l'électricité.

Picofarads	Nanofarads	Microfarads	Farads
1 pF	0,001 nF	0,000 001 μ F	
10 pF	0,01 nF	0,000 01 μ F	
100 pF	0,1 nF	0,000 1 μ F	
1 000 pF	1 nF	0,001 μ F	
10 000 pF	10 nF	0,01 μ F	
100 000 pF	100 nF	0,1 μ F	
1 000 000 pF	1 000 nF	1 μ F	0,000 001 F
		10 μ F	0,000 01 F
		100 μ F	0,000 1 F
		1 000 μ F	0,001 F
		10 000 μ F	0,01 F
		100 000 μ F	0,1 F
		1 000 000 μ F	1 F

Figure 2-72. Table de conversion des fractions de farads.

Le farad est une unité de grande valeur. Il se divise en microfarads (1 μ F = 1/1 000 000 F), en nanofarads (1 nF = 1/1 000 μ F) et en picofarads (1 pF = 1/1 000 nF).

La figure 2-72 montre une table de conversion entre ces différentes unités.



Méfiez-vous des condensateurs !

Lorsqu'un condensateur est chargé par une tension élevée, il peut retenir cette charge pendant plusieurs minutes, voire des heures. Aussi, si vous aviez l'idée saugrenue de l'ouvrir, sachez qu'il peut vous tuer aussi rapidement que si vous mettiez vos doigts dans une prise de courant. Heureusement, les circuits décrits dans ce livre n'utilisant que des tensions faibles, vous n'êtes pas concerné par ce phénomène.

Fondamentaux : les condensateurs

Il n'existe aucune connexion électrique à l'intérieur d'un condensateur, seulement deux fils reliés à des *plaques* internes très proches l'une de l'autre et séparées par un isolant polarisable appelé *diélectrique*. En conséquence, le courant continu (CC) ne circule pas dans un condensateur. Pourtant si vous reliez un condensateur à une pile, il se charge tout seul (figure 2-73), car les charges accumulées sur une plaque vont attirer les charges de signe opposé accumulées sur l'autre plaque.

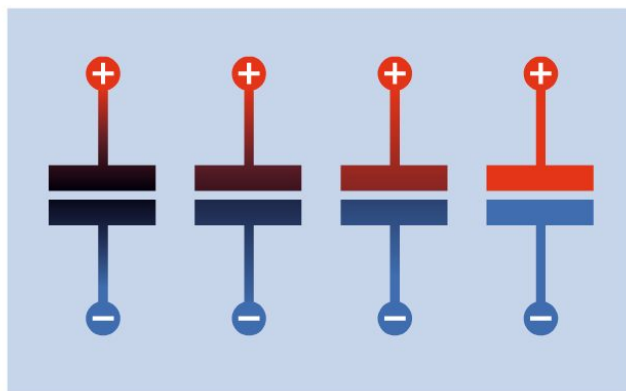


Figure 2-73. Un condensateur relié à une pile accumulera des charges opposées égales.

Dans les condensateurs modernes, les plaques ont été remplacées par des films métalliques très fins et flexibles.

Les deux types les plus courants sont les condensateurs en céramique – en général de faibles valeurs, ne pouvant stocker que des charges relativement petites – et les

condensateurs électrolytiques (ou électrochimiques), beaucoup plus gros. Les condensateurs électrochimiques sont en général encapsulés dans un boîtier métallique et portent des couleurs variées, le noir étant cependant plus répandu. Les anciens condensateurs en céramique étaient souvent en forme de disque ; les plus récents ont la forme de petites gouttes.

Les condensateurs en céramique ne sont pas polarisés ; vous n'avez donc pas à vous soucier du sens de leurs connexions à vos circuits. Les condensateurs électrolytiques sont polarisés et ne fonctionneront pas si vous ne les reliez pas dans le bon sens.

Pour les schémas, le symbole d'un condensateur comporte deux lignes représentant les deux plaques internes (figure 2-74). Si les deux lignes sont droites, le condensateur n'est pas polarisé et peut être relié dans n'importe quel sens. Si l'une des lignes est courbée, ce côté du condensateur doit être plus négatif que l'autre. Un signe + est parfois gravé.

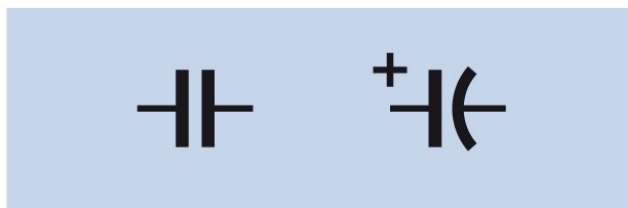


Figure 2-74. Les deux variantes du symbole du condensateur.

Le symbole avec la ligne courbe n'est plus très utilisé. Avec un condensateur électrochimique, il est nécessaire de le connecter dans le bon sens. Par ailleurs, des condensateurs en céramique multicouches de fortes valeurs sont maintenant disponibles et peuvent remplacer les condensateurs électrolytiques.

Dans mes schémas, je n'utiliserai que le symbole du condensateur non polarisé. À vous de choisir entre un condensateur électrolytique ou un condensateur en céramique.

Les plans des plaques de montage comporteront probablement des condensateurs électrolytiques. Il est toujours possible de les remplacer par des condensateurs en céramique, si vous préférez.



Respectez la polarité des condensateurs

Le type le plus courant de condensateur électrolytique possède des plaques en aluminium. Les deux autres types ont des plaques au tantale ou au niobium. Les trois variantes sont sensibles à la polarité. Sur la figure 2-75, un condensateur au tantale était inséré sur la plaque de montage, relié dans le mauvais sens à une source d'alimentation capable de délivrer une intensité élevée. Après environ une minute, le condensateur a éclaté en projetant des petites flammes qui ont brûlé la plaque de montage. C'est pour cette raison qu'il est très important de respecter les polarités !

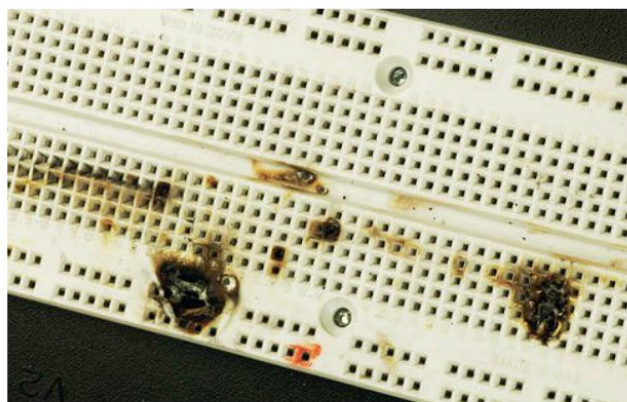


Figure 2-75. Conséquences d'une erreur de polarité d'un condensateur au tantale, inséré sur une plaque de montage et relié à une alimentation de forte puissance.

Fondamentaux : recherche des erreurs

Plus vous réaliserez de circuits sur des plaques de montage, plus ils deviendront complexes et les erreurs fréquentes.

L'une des erreurs les plus fréquentes, sur une platine de montage, consiste à insérer un fil dans la mauvaise rangée de trous. Par exemple, avec un relais dont les broches sont cachées, cela peut arriver très facilement. N'hésitez pas à vérifier plusieurs fois que vous l'avez disposé au bon endroit.

Une erreur plus subtile se produit lorsqu'on oublie les liaisons réalisées par les bandes métalliques internes de la plaque. Le circuit de la figure 2-76 semble très simple. On voit que le pôle positif de l'alimentation envoie le courant à une LED par un fil de pontage, puis retourne au

pôle négatif, en passant à travers une résistance. Si vous réalisez ce circuit, tel que sur la figure, c'est certain qu'il ne fonctionnera pas.

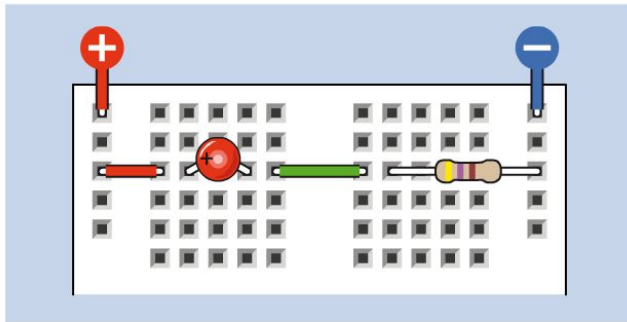


Figure 2-76. Le circuit de cette plaque de montage ne fonctionnera pas. Pouvez-vous dire pourquoi ?

Pire, si vous inversez la LED et la résistance, ce circuit grilera instantanément la LED.

L'explication est immédiate si vous observez la vue en transparence de la figure 2-77. Le problème est que les deux fils de la LED sont reliés à la même bande métallique interne de la plaque. Le courant électrique a le choix de s'écouler à travers la LED ou à travers la bande conductrice. Comme la résistance de la pièce métallique est infiniment plus faible que celle de la LED, les électrons préféreront passer par cette pièce et la LED restera éteinte.

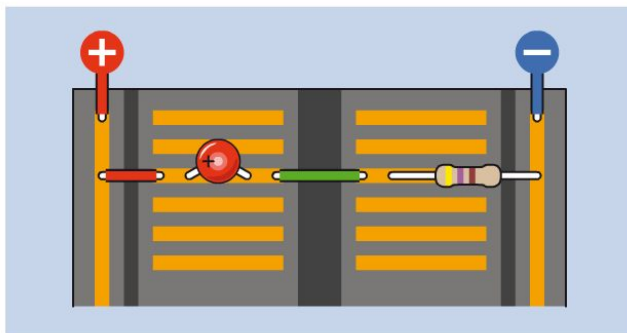


Figure 2-77. Vue en transparence permettant d'expliquer pourquoi ce circuit ne fonctionne pas.

De nombreuses erreurs sont possibles. Alors comment les trouver rapidement et de façon certaine ? Il vous suffit d'être méthodique et de bien suivre ces étapes :

1. Vérifiez les tensions. Reliez le fil rouge de votre multimètre à une connexion proche du bus positif de votre plaque de montage. Réglez le multimètre pour la mesure des tensions continues (DC volts, sauf indication contraire précisée pour l'expérience). Assurez-vous que la tension d'alimentation est bien

appliquée au circuit. Reliez ensuite le fil de mesure noir à différents points du bus négatif. L'affichage du multimètre devrait être voisin de la valeur de la tension d'alimentation. Si vous obtenez une valeur proche de zéro, vous avez probablement oublié d'ajouter un cavalier à l'un des points de coupure du bus négatif. Si vous trouvez une valeur de quelques volts, bien inférieure à la tension d'alimentation, vous avez probablement un court-circuit qui provoque une baisse de tension de la pile quelque part (si vous utilisez une pile).

Reliez ensuite la pointe de touche noire à une liaison en haut du bus négatif et vérifiez le bus positif de bas en haut.

Finalement, en laissant la pointe de mesure noire reliée au bus négatif, utilisez le fil rouge pour vérifier les tensions en des points pris au hasard dans le circuit. Si vous trouvez une tension proche de zéro, une liaison est probablement manquante quelque part, ou peut-être qu'un composant ou un fil ne fait pas correctement le contact sur la plaque de montage.

2. Vérifiez l'emplacement des fils et composants. Assurez-vous que tous les fils de pontage et les broches des composants sont au bon endroit sur la platine d'essais.
3. Vérifiez l'orientation des composants. Les diodes, les transistors et les condensateurs polarisés doivent être correctement orientés. Lorsque vous entamerez l'utilisation des circuits intégrés, plus loin dans ce livre, vérifiez qu'ils sont bien orientés et qu'aucune de leurs broches ne soit pliée et dissimulée sous le composant.
4. Vérifiez les liaisons. Parfois, même si cela arrive rarement, un composant peut être mal connecté à l'intérieur de la plaque. Si vous rencontrez une panne intermittente inexplicable ou une tension nulle, essayez de repositionner certains composants. Selon ma propre expérience, ce problème arrive si vous utilisez des plaques de montage bon marché. Cela arrivera également si vous utilisez du fil de câblage d'un diamètre inférieur à celui de la jauge AWG 22.
5. Vérifiez la valeur des composants. Vérifiez que toutes les valeurs des résistances et des condensateurs sont correctes. Ma procédure habituelle consiste à vérifier chaque résistance avec un multimètre, avant de l'insérer. Cela prend un peu de temps, mais pourrait finalement vous en faire gagner beaucoup.

6. Vérifiez le bon état des composants. Les circuits intégrés et les transistors peuvent avoir été endommagés par une tension incorrecte, une polarité non respectée ou par l'électricité statique.
7. Pensez à vous ! Lorsque tout a échoué, faites une pause. Travailler de façon acharnée, pendant de longues périodes peut altérer votre vision et vous empêcher de voir ce qui ne va pas. Après une pause, la solution peut soudain vous apparaître évidente.

Je vous conseille de marquer la page de cette procédure de recherche de défauts, afin de pouvoir y revenir par la suite, si quelque chose ne fonctionne pas.

Historique : Michael Faraday et les condensateurs

Michael Faraday (figure 2-78) était chimiste et physicien anglais et vécut de 1791 à 1867. Il a donné son nom à l'unité de mesure de la capacité électrique : le farad (F).

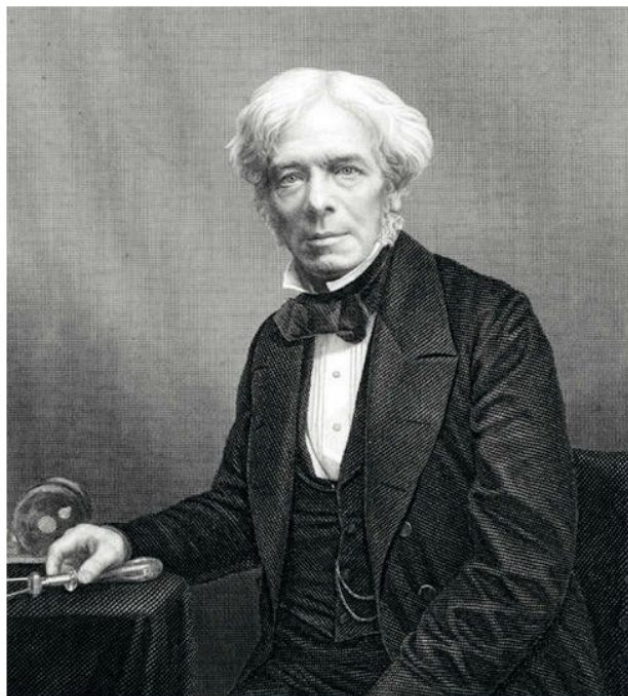


Figure 2-78. Michael Faraday, à la mémoire de qui le farad fut adopté.

Malgré une éducation primaire et des connaissances en mathématiques réduites, il lisait de très nombreux livres pendant son apprentissage du métier de relieur, cela lui a permis de s'instruire en autodidacte. Rappelons qu'au

xix^e siècle, les propriétés fondamentales de l'électricité pouvaient être mises en évidence par des expériences relativement simples. Il est l'auteur de découvertes majeures, comme l'induction électromagnétique, qui a permis le développement des moteurs électriques. Il a également constaté que le magnétisme avait une influence sur les rayons lumineux.

Ses travaux lui ont valu de nombreuses distinctions et, entre 1991 à 2001, son portrait était imprimé sur les billets de 20 £.

Expérience 9 : le temps et les condensateurs

Les électrons se déplacent à une vitesse presque égale à celle de la lumière. Nous pouvons cependant les utiliser pour mesurer le temps en secondes, minutes, ou même en heures. Je vous propose cette expérience pour le démontrer.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque de montage, du fil de câblage, la pince coupante, la pince à dénuder, des fils de test et un multimètre
- 1 pile de 9V neuve et son connecteur
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 LED générique
- 1 résistance de chacune des valeurs suivantes : 470 Ω , 1K et 10K
- 1 condensateur de chacune des valeurs suivantes : 0,1 μ F, 1 μ F, 10 μ F, 100 μ F et 1 000 μ F

Charger un condensateur

Pour commencer, à l'aide de votre multimètre, réglé sur DC, mesurez la tension de la pile de 9V. Pour cette expérience, elle ne doit pas être inférieure à 9,2 V.

Installez les deux interrupteurs tactiles, une résistance de 1K et un condensateur de 1 000 μ F sur votre plaque de montage comme sur la figure 2-79. Reliez votre multimètre aux bornes du condensateur, à l'aide de fils de test pour mesurer la tension, tout en conservant les mains libres.

Branchez votre pile sur son connecteur et reliez ses fils à la plaque d'essais afin de distribuer la tension de 9 V CC aux deux bus d'alimentation, en reliant le pôle positif à gauche, comme le montre la figure.

Si votre multimètre indique une tension supérieure à 0,1 V, déchargez le condensateur en appuyant sur le bouton B, ce qui court-circuitera ses deux fils.

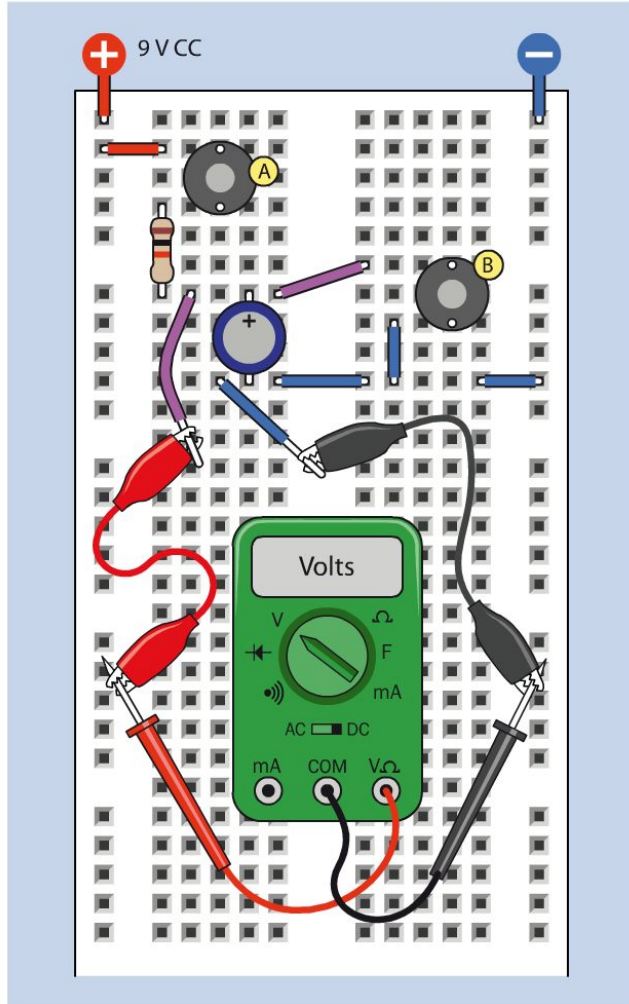


Figure 2-78. Montage simple pour mesurer le temps de charge d'un condensateur. Un condensateur de 1 000 μF et une résistance de 1K sont utilisés.

Le schéma de la figure 2-80 devrait vous aider à comprendre le fonctionnement de ce circuit.

Maintenez ensuite le bouton-poussoir A tout en actionnant un chronomètre et mesurez en combien de secondes le condensateur atteint la tension de 9,0 V. Quand j'ai fait

cette expérience, le multimètre a atteint cette valeur en un peu plus de 3 s.

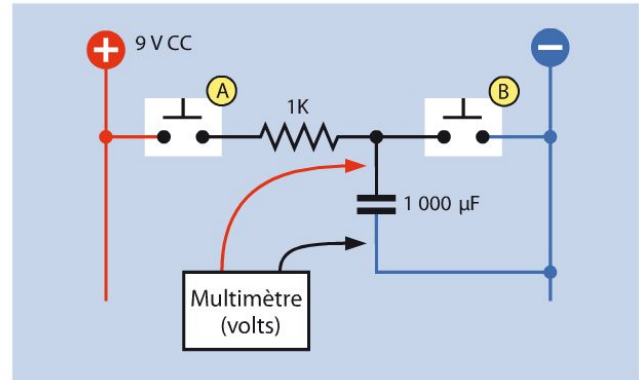


Figure 2-80. Vision schématique du circuit de la figure 2-79.

Le pôle positif du condensateur est devenu « plus positif » et le pôle négatif « plus négatif », alors que les trous (électrons manquants) et les électrons s'attirent mutuellement sur les plaques. La différence de potentiel entre les deux fils du condensateur a augmenté, alors que le courant électrique ne le traversait pas. Dans tout ouvrage d'introduction à l'électronique, vous trouverez l'affirmation suivante : un condensateur bloque le courant continu (CC).

Tant que l'on maintient une tension fixe aux bornes d'un condensateur, cela reste exact.

Réseau RC

Retirez la résistance de 1K et remplacez-la par celle de 10K. Si le multimètre indique encore une certaine tension aux bornes du condensateur, déchargez-le en appuyant sur le bouton-poussoir B.

Répétez maintenant le test. En combien de temps le condensateur atteint-il la tension de 9V avec la résistance de 10K ?

Cette combinaison simple d'un condensateur et d'une résistance s'appelle un réseau RC (R pour résistance et C pour condensateur). C'est un concept important en électronique. Avant d'expliquer en quoi il consiste, quelques questions sont à considérer :

- En utilisant la résistance de 10K, pour atteindre la tension de 9 volts, le condensateur a-t-il pris exactement 10 fois plus de temps qu'avec la résistance de 1K ?
- La tension aux bornes du condensateur a-t-elle augmenté à un rythme constant ou augmente-t-elle plus rapidement au début de l'expérience, ou vers la fin ?

- En attendant suffisamment longtemps, le condensateur va-t-il atteindre la tension initiale de la pile, que vous avez préalablement mesurée ?

Tension, résistance et capacité

Imaginez la résistance comme un robinet limitant un écoulement d'eau et le condensateur comme un ballon que vous essayez de remplir (figure 2-81). Si vous serrez le robinet pour obtenir un mince filet d'eau, le ballon mettra plus de temps à se remplir. Mais si vous attendez assez longtemps, le ballon finira par se remplir complètement. En supposant qu'il n'éclate pas, le phénomène s'arrêtera quand la pression à l'intérieur du ballon sera égale à la pression qui passe dans le tuyau.

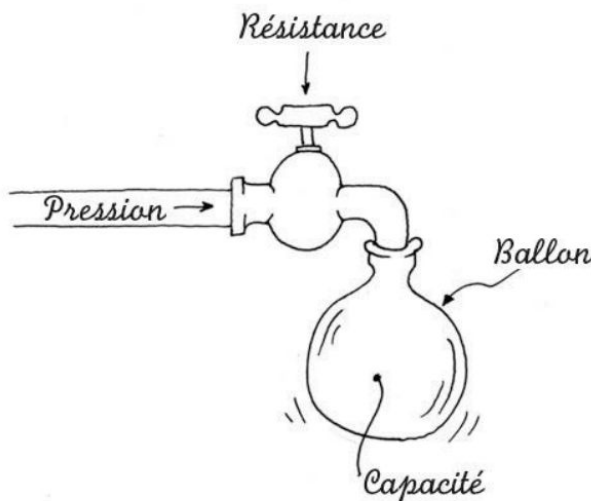


Figure 2-81. L'eau s'écoulant dans un ballon peut être comparée aux électrons qui circulent dans un condensateur.

Cette explication ignore un facteur important : pendant que le ballon commence à se remplir, il se tend, et augmente sa pression interne. En s'accroissant, la pression interne du ballon s'oppose davantage au flux de l'eau qui entre. Ainsi, plus le temps passe, plus l'eau pénètre lentement dans le ballon.

Comment comparer cela avec le flux d'électrons qui circule dans le condensateur ? Le concept est similaire. Au début, les électrons se précipitent dans le condensateur, mais plus les places disponibles sont occupées, plus les derniers arrivants ont besoin de temps pour trouver une place libre. Le processus de charge ralentit de plus en plus. En théorie, le condensateur n'atteint jamais la tension qui lui est appliquée lorsqu'il se charge.

Historique : la constante de temps

La vitesse à laquelle un condensateur se charge s'exprime selon une formule appelée « constante de temps ». Sa définition est très simple :

$$\tau = R \times C$$

τ est la constante de temps exprimée en secondes, quand le condensateur de capacité C se charge en passant à travers une résistance R exprimée en ohms.

Revenons au circuit que vous avez testé en premier et qui utilisait la résistance de 1K. Remplaçons les valeurs dans la formule, après avoir converti les unités en ohms et farads :

$$\tau = 1\,000 \times 0,001$$

Ainsi, pour ces valeurs, la constante de temps vaut 1 seconde.

Cela signifie-t-il que le condensateur sera complètement chargé en 1 seconde ? Ce n'est malheureusement pas si simple.

La constante de temps τ représente le temps nécessaire à un condensateur pour atteindre 63 % de la tension qui lui est appliquée lors de sa charge, s'il part de zéro volt.

Que se passe-t-il si la charge du condensateur ne commence pas à partir d'une tension nulle ?

Si on commence la mesure alors que le condensateur a déjà atteint une certaine tension, la définition devient un peu plus compliquée. Si V_{DIF} est la différence entre la tension aux bornes du condensateur et la tension d'alimentation, τ est le nombre de secondes nécessaire au condensateur pour ajouter 63 % de V_{DIF} à sa charge actuelle.

Pourquoi 63 % ? Pourquoi pas 62 %, ou 64 % ou même 50 % ? La réponse à cette question est un peu trop complexe pour être traitée dans ce manuel ; je vous invite à consulter d'autres références pour en savoir plus. Préparez-vous alors à utiliser des équations différentielles.

Prenez l'exemple d'une personne qui mange un gâteau. Au début, il est affamé, il avale alors 63 % du gâteau en 1 s. Il prend à nouveau 63 % de ce qui reste du gâteau et, comme il a un peu moins faim, il mange cette plus petite part en 1 s (c'est la constante de temps). Pour la troisième part, il prend à nouveau 63 % de ce qui reste du gâteau et l'ingurgite à nouveau en 1 s. Et ainsi de suite. Petit à petit, il comble sa faim avec le gâteau, comme un condensateur qui se charge d'électrons. Seulement, il ne mange jamais tout le gâteau, puisqu'il ne prend que 63 % de ce qui reste à chaque fois.



Figure 2-82. Si notre gourmand ne mange à chaque fois que 63 % de ce qui reste du gâteau, il remplit son estomac à la manière d'un condensateur. Peu importe le temps que ça lui prend, le gâteau ne peut jamais être terminé et son estomac n'est jamais comblé.

La figure 2-83 démontre ce processus d'une autre façon. Après chaque constante de temps (qui est de 1 s avec un condensateur de 1 000 μF et une résistance de 1K), le condensateur acquiert une charge égale à 63 % de la différence entre sa charge précédente et la tension qui lui est appliquée.

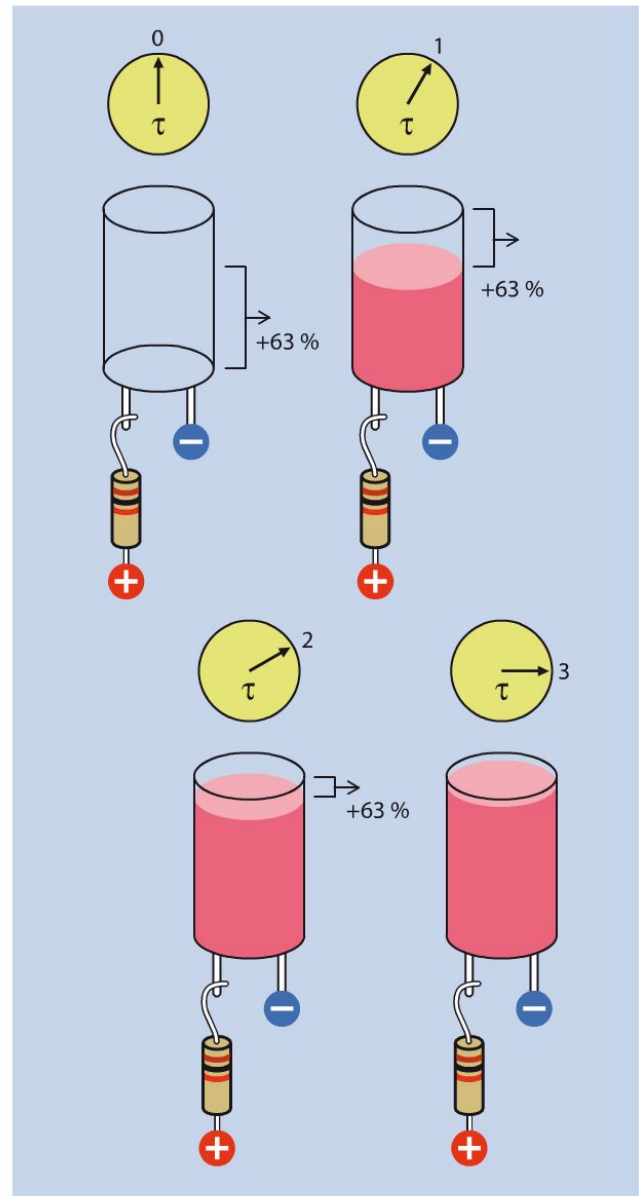


Figure 2-83. Autre façon de considérer la charge d'un condensateur.

Si on utilisait des composants parfaits, le processus se poursuivrait à l'infini. En réalité, il est établi de façon arbitraire que : après $5 \times \tau$, le condensateur sera si proche de 100 % de la charge totale que l'on peut considérer que le processus est terminé.

Historique : représentation graphique

Je souhaite tracer une courbe montrant la tension aux bornes d'un condensateur qui se charge. Pour ce faire, je vais calculer les données en utilisant la formule de la constante de temps.

Supposons que V_{COND} soit la tension présente aux bornes d'un condensateur et que V_{DIF} soit la différence entre la tension de sa charge et celle qui lui est appliquée par la pile. La formule qui suit va me donner la valeur V_{NOUV} de la tension aux bornes du condensateur après une constante de temps :

$$V_{\text{NOUV}} = V_{\text{COND}} + (0,63 \times V_{\text{DIF}})$$

Supposons que la pile fournisse exactement 9 V et que la tension initiale du condensateur est de 0 V. Nous avons alors $V_{\text{COND}} = 0$ et $V_{\text{DIF}} = 9$. Plaçons ces valeurs dans la formule :

$$V_{\text{NOUV}} = 0 + (0,63 \times 9) = 5,67$$

Ainsi, après une constante de temps, le condensateur a emmagasiné 5,67 V.

Et après une deuxième seconde ? Nous devons répéter le calcul, à partir des nouvelles valeurs. La tension courante aux bornes du condensateur V_{COND} est maintenant de 5,67 V. La pile fournit toujours 9 V ; V_{DIF} vaut donc $9 - 5,67 = 3,33$ V. Utilisons ces valeurs dans la formule :

$$V_{\text{NOUV}} = 5,67 + (0,63 \times 3,33) = 7,77$$

Après deux secondes, le condensateur atteint la tension de $5,67 + 2,1 = 7,77$ V.

On peut ainsi répéter ce calcul autant de fois que l'on veut, pour créer une suite de valeurs (arrondies à deux décimales) représentant la tension aux bornes du condensateur à chaque seconde, en considérant une alimentation de 9 V :

- Après 1 s : 5,67 V
- Après 2 s : 7,77 V
- Après 3 s : 8,54 V
- Après 4 s : 8,83 V
- Après 5 s : 8,94 V
- Après 6 s : 8,98 V

Le graphique de la figure 2-84 montre la courbe tracée à partir de ces valeurs.

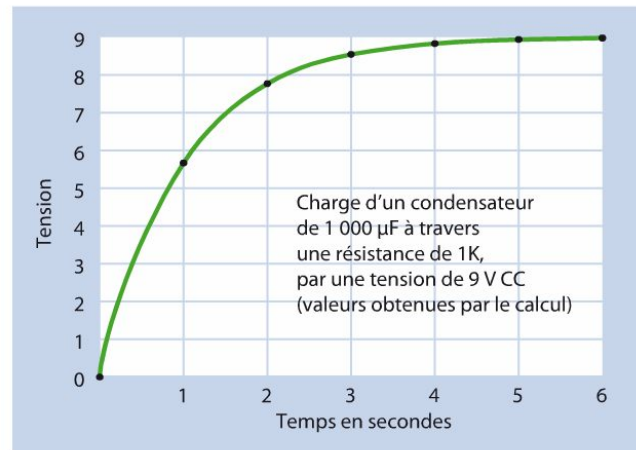


Figure 2-84. Cette courbe montre comment la charge d'un condensateur s'accumule durant un temps donné.

Vérification expérimentale

Je vous ai indiqué comment calculer la charge d'un condensateur placé dans un réseau RC. Cette formule se vérifie de façon expérimentale.

Revenez au circuit que vous avez déjà utilisé (figure 2-79), avec une résistance de 10 K. Demandez à quelqu'un de chronométrer pendant que vous suivez l'affichage de votre multimètre et de vous donner le « top » toutes les dix secondes ; vous devrez noter la tension indiquée par le multimètre à cet instant précis. Suivez cette procédure pendant une minute.

Comme vous utilisez une résistance de 10 K, la constante de temps est maintenant de 10 s. La série des valeurs que vous relevez devrait ressembler à celle que j'ai établie pour une constante de 1 s, à la différence qu'il s'agit maintenant d'intervalles de 10 secondes. Les tensions mesurées devraient être proches des miennes, mais elles ne correspondent pas tout à fait. Il y a de nombreuses raisons à cela :

- Votre pile ne délivre pas une tension identique à la mienne.
- Votre résistance ne vaut pas exactement 10 000 Ω .
- Votre condensateur ne fait pas exactement 1 000 μF .
- Votre multimètre n'est pas totalement précis.
- Il vous faut quelques millisecondes pour lire l'afficheur de votre multimètre.
- Le top du chronomètre n'est peut-être pas donné avec assez de précision, toutes les 10 s.

Deux autres facteurs ne sont pas à négliger. D'une part, les condensateurs ne stockent pas parfaitement

l'énergie. Ils ont des *fuites* internes qui provoquent une perte partielle de la charge accumulée. Cela se produit même si la charge du condensateur s'accroît. Vers la fin du processus, les électrons s'écoulent si lentement que le courant de fuite (vitesse à laquelle ils s'écoulent par perte) devient comparativement significatif.

Il ne faut pas oublier la résistance interne de votre multimètre ; elle est certes très élevée, mais elle laisse quand-même passer une faible intensité. Cela signifie que votre multimètre s'approprie une partie de la charge destinée au condensateur pendant que vous effectuez les mesures. En effet, l'action de mesurer modifie bel et bien la valeur que vous essayez de mesurer ! C'est un problème courant en physique et en ingénierie.

On peut imaginer des solutions pour minimiser tous ces facteurs, mais il est impossible de les éliminer totalement. Il y aura toujours des erreurs dues à l'expérimentation. C'est le défi à relever quand on passe à la pratique pour vérifier une théorie. Une vérification peut être un processus très lent qui requiert beaucoup de patience.

Couplage capacitif

Maintenant que vous savez charger les condensateurs, je dois revenir à cette affirmation déjà énoncée : un condensateur bloque le courant continu, si l'on maintient une tension fixe à ses bornes.

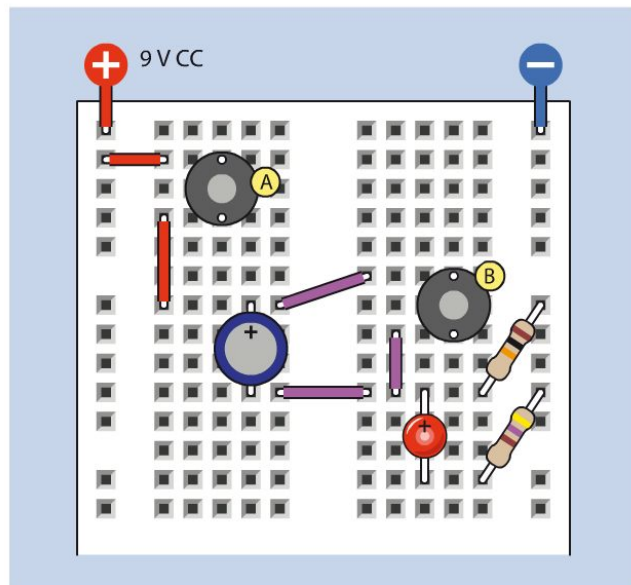


Figure 2-85. Le clignotement d'une LED rouge montre le comportement d'un condensateur lorsqu'une brusque variation de tension se produit.

Que se passe-t-il alors si la tension n'est pas stable ? Et que se passe-t-il au moment où un condensateur non chargé est soudainement relié à une source de tension ?

Dans ces circonstances, le condensateur permet à un signal de le traverser.

Les plaques à l'intérieur d'un condensateur ne se touchent pas ; dès lors, comment un signal électrique pulsé peut-il passer de l'une à l'autre ?

Je vais expliquer « pourquoi » et « comment » un peu plus loin, mais d'abord vous devez bien comprendre ce qui se passe.

Observez les composants sur la plaque de montage de la figure 2-85. Le câblage ressemble à celui de la figure 2-79, mais la résistance de 10K a été déplacée de la gauche vers la droite du plan et on a ajouté une LED et une résistance de 470 Ω.

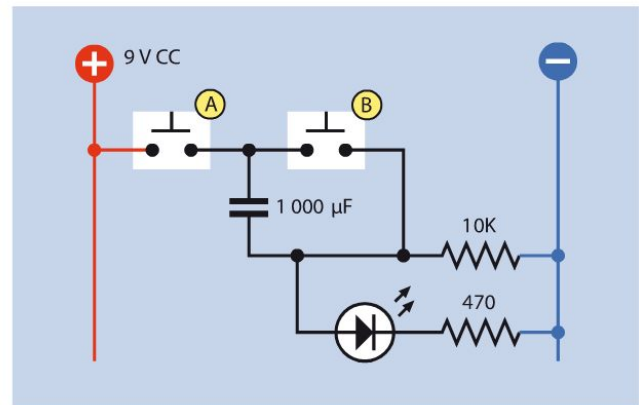


Figure 2-86. Représentation schématisée de la figure 2-85.

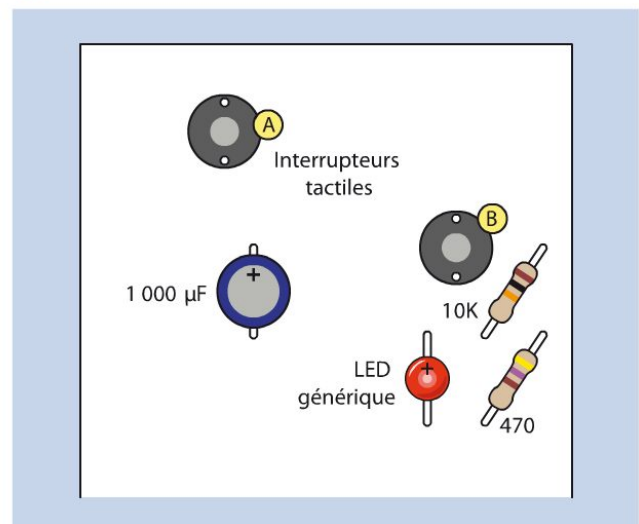


Figure 2-87. Valeur de chaque composant.

Après avoir assemblé le circuit, n'oubliez pas d'appuyer sur le bouton-poussoir B afin de décharger le condensateur. Lorsque vous appuyez ensuite sur le bouton A, vous constatez que la LED s'allume puis s'éteint lentement.

Appuyez à nouveau sur le bouton A. Cette fois, un faible éclairage se produit, ou même aucun. De toute évidence, le condensateur doit être déchargé au début de l'expérience pour que le phénomène puisse se produire. Renouvelez le processus.

Nous savons qu'au début, le condensateur n'a pratiquement aucune charge positive sur sa connexion inférieure, car elle est reliée à la masse (pôle négatif de l'alimentation), par l'intermédiaire de la résistance de 10K. Nous savons également que la connexion supérieure du condensateur avait une tension pratiquement nulle.

Vous avez alors appuyé sur le poussoir A, ce qui a envoyé soudainement une impulsion positive, et la LED placée après le condensateur s'est allumée. La seule explication est que l'intensité provenait du condensateur.

Courant de déplacement

Essayons à nouveau en utilisant le multimètre au lieu de la LED et sa résistance en série (figures 2-88 et 2-89). Déchargez le condensateur en appuyant sur le bouton B et vérifiez que votre multimètre indique bien une tension proche de 0 V.

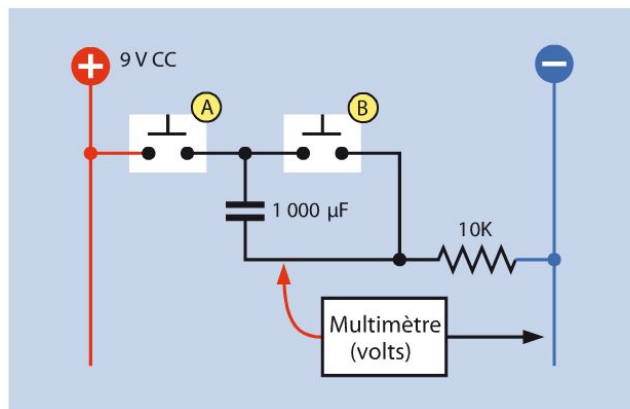


Figure 2-88. Représentation schématique de la figure 2-89.

Observez avec une grande attention votre multimètre pendant que vous maintenez le bouton A enfoncé. Un multimètre digital ne répond pas immédiatement ; vous devriez cependant constater une augmentation soudaine de la tension, qui diminuera ensuite lentement.

Le tracé d'un oscilloscope relié à ce circuit ressemble à la courbe en bas de la figure 2-89. L'augmentation de la tension est si rapide qu'elle paraît instantanée.

Le comportement d'un condensateur, qui permet à une variation soudaine de tension de le traverser, est bien connu et souvent utilisé en électronique.

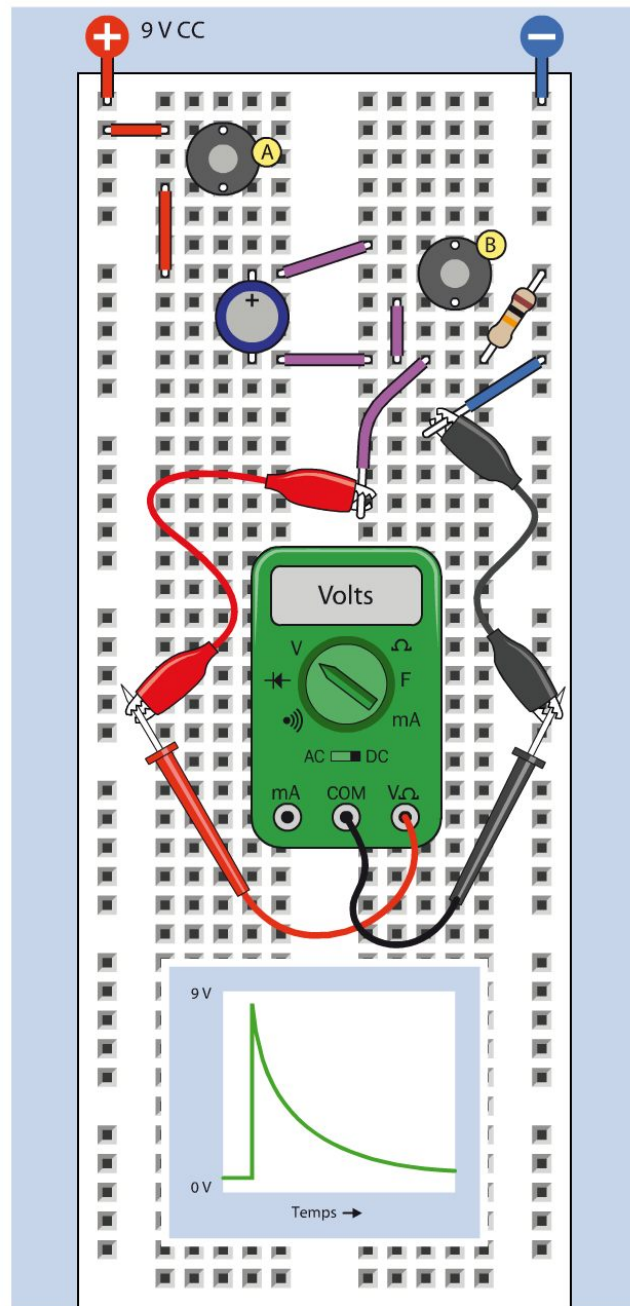


Figure 2-89. Un multimètre a remplacé la LED et la résistance série de 470 Ω utilisées dans la version précédente de ce circuit.

Ce comportement a intéressé un expérimentateur nommé James Maxwell, qui pensait que cela ne devait pas se produire. Il a alors développé une théorie et imaginé une expression pour exprimer ce qu'il constatait. C'est ce qu'il a appelé le *courant de déplacement*.

D'autres théories ont été émises depuis. Alors que la plupart des ouvrages indiquent simplement : « un condensateur bloque le courant continu, mais il permet la transmission des fluctuations de tension », c'est un phénomène qui suscite de nombreuses hypothèses. Par exemple, un apport de courant crée un effet de champ à l'intérieur d'un condensateur, ce qui peut induire une tension sur la plaque opposée.

Si vous utilisez un condensateur de faible valeur, vous constaterez qu'il transmet une brève impulsion. Déconnectez le multimètre, réinstallez la LED et sa résistance de $470\ \Omega$ sur le circuit et refaites l'expérience avec des condensateurs de $100\ \mu\text{F}$, $10\ \mu\text{F}$, $1\ \mu\text{F}$ et $0,1\ \mu\text{F}$. À la fin des essais, vous constaterez que la LED ne s'allume à peine.

Le courant alternatif

Si vous inversez le circuit (figures 2-90 et 2-91), cela fonctionne toujours, bien que le courant circule en sens opposé. Le multimètre mesure toujours la tension à la jonction entre la résistance et le condensateur.

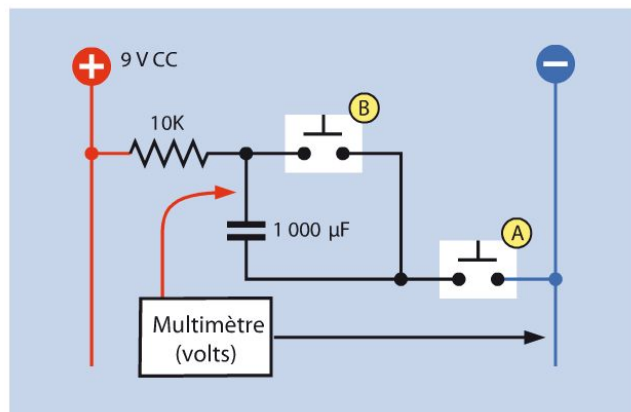


Figure 2-90. Schéma du circuit de la figure 2-91.

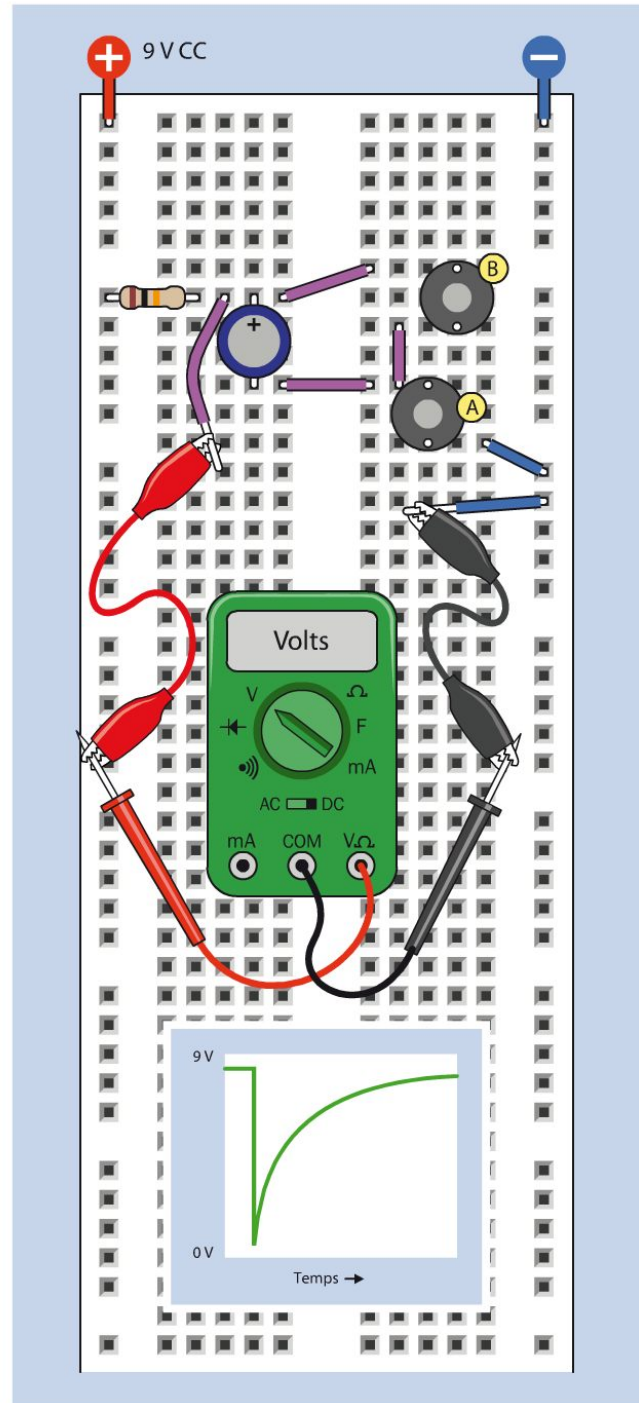


Figure 2-91. Le circuit précédent a été modifié en inversant la tension.

Après avoir maintenu le bouton A enfoncé pour charger le condensateur, le multimètre indique une tension d'environ 9V CC , car la connexion supérieure du condensateur

est reliée au bus positif par l'intermédiaire de la résistance de 10K. Le condensateur bloque la tension continue ; il se comporte donc comme une résistance infinie et sa charge positive n'a « aucun chemin pour s'écouler ». La figure 2-92 montre comment la tension au point de jonction de deux résistances augmente en fonction de la résistance entre ce point et la masse augmente.

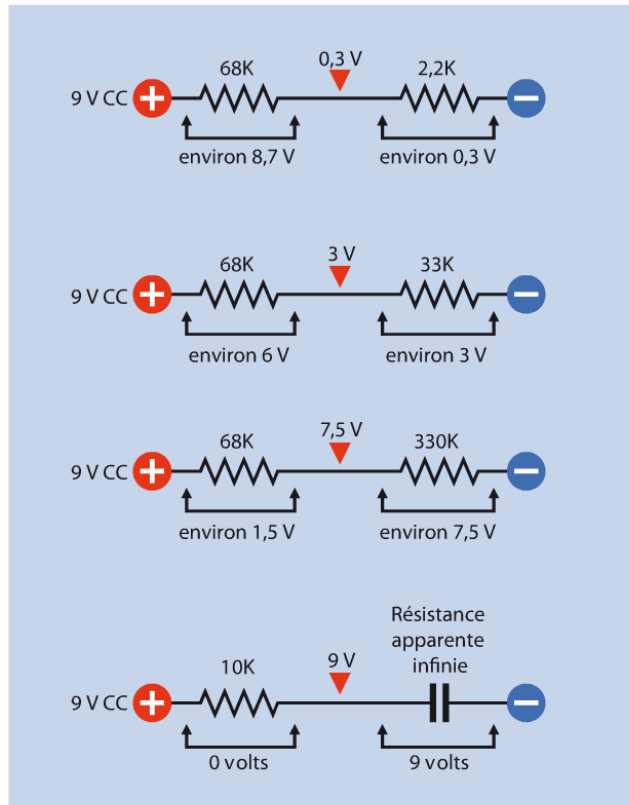


Figure 2-92. Quand deux résistances sont connectées en série, celle de gauche étant reliée au pôle positif de l'alimentation et celle de droite à la masse, la tension au point de liaison entre les deux résistances augmente avec la valeur de la résistance de droite. Un condensateur présente une résistance presque infinie au passage du courant continu.

Toutefois, en appuyant sur le bouton A du circuit, vous transmettez une impulsion négative. La résistance apparente du condensateur disparaît momentanément pendant que l'impulsion le traverse, provoquant une chute brutale de la valeur indiquée par votre multimètre. Le condensateur se recharge alors lentement, comme il le faisait dans la première expérience.

La courbe de la figure 2-91 donne une idée de la façon dont la charge du condensateur varie :

- Un condensateur bloque effectivement le courant continu.
- Le même condensateur permettra à une variation de tension rapide de le traverser, quel que soit le sens du courant.
- Le condensateur accumulera ensuite la charge comme cela est expliqué au début de cette expérience.

Ainsi, comme le courant alternatif est une série d'impulsions relativement négatives et d'impulsions relativement positives, un condensateur lui permettra de le traverser.

La valeur du condensateur est importante. Si vous utilisez des condensateurs de faibles capacités (valeurs), vous constaterez qu'ils ne réagiront que rapidement. Une petite capacité transmettra des fréquences élevées, mais bloquera les fréquences basses – et ce comportement est très utile pour de nombreuses applications. Vous le constaterez vous-même dans l'expérience 29. Souvenez-vous que les signaux audio sont une sorte de courant alternatif, car ils fluctuent rapidement.

Quand un condensateur est placé dans un circuit pour transmettre une tension alternative tout en bloquant le courant continu, il s'agit d'un *condensateur de couplage*. Il peut laisser un signal transiter d'une partie d'un circuit à une autre, tout en bloquant le passage des tensions continues, ce qui est totalement différent. J'utiliserai ce concept quand nous étudierons l'expérience 11.

Expérience 10 : un interrupteur à transistor

Maintenant que vous connaissez le comportement des condensateurs, nous allons aborder un autre composant fondamental : le transistor. Après avoir étudié son fonctionnement, vous verrez comment on peut utiliser conjointement des condensateurs et des transistors.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque de montage, du fil de câblage, la pince coupante, la pince à dénuder, des fils de test et un multimètre
- 1 transistor 2N2222
- 1 pile de 9 V et son connecteur
- 2 résistances de 470 Ω et une de 1M
- 1 potentiomètre ajustable de 500K
- 1 LED générique

Test du bout du doigt

Le transistor 2N2222 est encore aujourd'hui le semi-conducteur le plus largement utilisé. Il a été créé par Motorola en 1962 et a toujours été produit depuis, sous différentes formes.

Le brevet du 2N2222 est passé dans le domaine public depuis longtemps. De ce fait, n'importe quelle société peut en produire sa propre version. Certaines versions sont encapsulées dans un petit boîtier en plastique noir, certaines autres dans une petite capsule métallique (figure 2-23). Pour notre besoin, n'importe laquelle conviendra. Rappelez-vous cependant les précautions à respecter (voir la section « Essentiel : transistors » page 47) : certains 2N2222 ne sont pas identiques à d'autres et vous devez utiliser le type correct.

Insérez votre transistor dans la plaque de montage avec une LED et une résistance de 470 Ω , comme sur la figure 2-93. Le fil le plus long de la LED doit être orienté vers la gauche, comme l'indique le signe +. Vérifiez également que le côté aplati du transistor est orienté vers la droite. Dans le cas improbable où vous utiliseriez un transistor à boîtier métallique, le petit ergot doit être orienté vers la gauche.

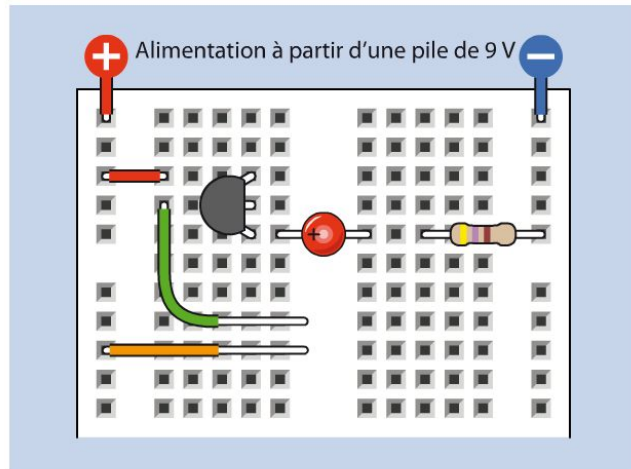


Figure 2-93. Réalisation de votre premier circuit de test d'un transistor sur une plaque de montage.

Notez que les fils orange et vert sont dénudés sur une longueur additionnelle. Si vous utilisez des fils prédécoupés, vous devrez redresser une de leurs extrémités, afin qu'ils restent à plat sur la platine.

Voici maintenant la partie amusante de l'expérience. Appuyez un doigt sur les parties métalliques des fils orange et vert (figure 2-94), tout en observant la LED. S'il ne

se passe rien, humidifiez légèrement votre doigt et réessayez. Plus vous appuyez, plus la LED doit briller. Le transistor amplifie le faible courant qui traverse votre doigt.

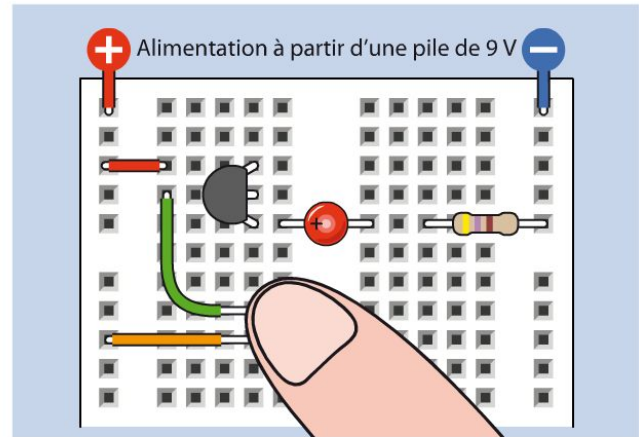


Figure 2-94. En utilisant votre doigt, la LED brille plus ou moins intensément.



N'utilisez jamais vos deux mains !

La démonstration de cet interrupteur à contact tactile est sans danger si le courant ne traverse que votre doigt. Vous ne sentirez rien, car il s'agit d'une tension de 9 V CC provenant d'une pile. Toutefois, il est préférable de ne pas utiliser les doigts des deux mains pour appuyer sur l'un et l'autre fil. Cela permettrait en effet au courant de traverser votre corps. Même s'il n'y a aucune raison que cela vous blesse, car le courant est faible, il ne faut pas prendre l'habitude de laisser un courant électrique passer d'une main à l'autre. De même, lorsque vous touchez les fils, ne les laissez pas vous piquer la peau. Cela veut dire également que vous ne devez jamais appliquer une tension sur un bijou qui transperce votre peau.

À l'intérieur de l'interrupteur tactile

La figure 2-95 montre les liaisons internes de la plaque de montage utilisées dans cette expérience. Vous remarquez que le fil inférieur du transistor est relié à la LED puis à la résistance de 470 Ω et jusqu'au bus négatif, par l'intermédiaire de la plaque d'essais. Un courant suffisant traverse le transistor et permet ainsi d'éclairer la LED.

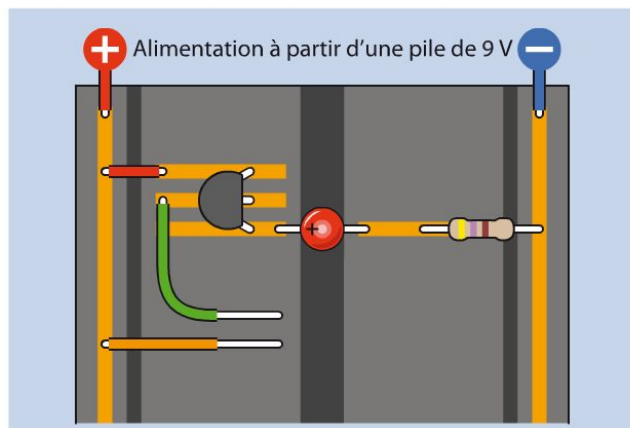


Figure 2-95. Vue transparente de la plaque de montage de la figure précédente.

Un courant électrique traverse la peau de votre doigt, pour ensuite traverser le fil central du transistor. Ce courant est trop faible pour allumer une LED, mais le transistor possède un troisième fil qui est relié au bus positif. Le courant électrique pénètre dans le transistor par ce fil, et ensuite il est en quelque sorte contrôlé par le très faible courant qui passe par votre doigt vers le fil du centre du transistor. Ce principe est illustré sur la figure 2-96.

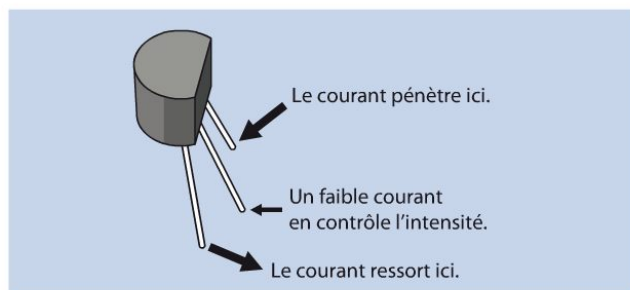


Figure 2-96. Fonctionnement simplifié d'un transistor NPN.

Ce phénomène est très différent du comportement d'un condensateur. Ce dernier transmet uniquement une impulsion rapide, alors qu'un transistor contrôle le passage d'un courant stable.

Fondamentaux : les différents transistors

Le composant que vous utilisez dans cette expérience est un transistor *bipolaire* dont les deux variantes sont appelées *NPN* et *PNP*. Le type *NPN*, que vous avez utilisé, possède trois couches internes de silicium, deux couches « N » ayant un surplus de porteurs de charges négatives. Intercalée entre les deux autres, la couche « P » comporte un surplus de porteurs de charges positives.

Pour plus de détails sur le fonctionnement d'un transistor au niveau atomique, je vous invite à consulter des ouvrages plus spécialisés.

Les trois connexions d'un transistor bipolaire NPN sont le collecteur, la base et l'émetteur (figure 2-97).

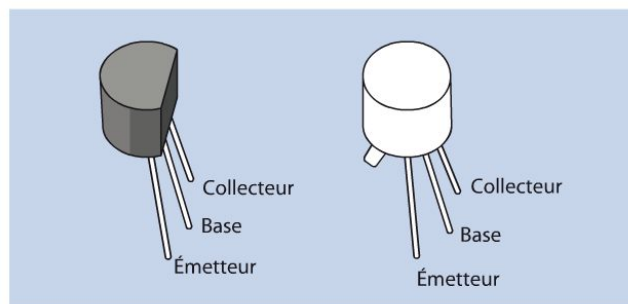


Figure 2-97. Les trois connexions d'un transistor bipolaire NPN dans leur boîtier plastique (à gauche) ou métallique (sur la droite).

Quand la base d'un transistor NPN est légèrement plus positive que son émetteur, le transistor permet le passage d'un courant positif qui le traverse du collecteur vers l'émetteur.

Grâce à ce comportement, un très faible courant qui entre dans la base du transistor est capable de contrôler un courant plus important qui arrive par le collecteur.

Un transistor PNP se comporte de façon inverse : il permet à un courant négatif de circuler de son collecteur vers son émetteur, quand sa base est légèrement plus négative que son émetteur. Ces transistors sont mieux adaptés dans certains circuits mais cependant moins utilisés. Nous ne nous en servons pas dans cet ouvrage.

Sur la figure 2-98, quatre variantes du symbole pour un transistor NPN sont représentées.

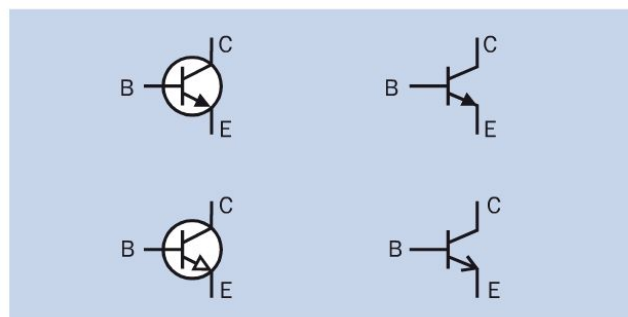


Figure 2-98. N'importe lequel de ces symboles peut être utilisé pour représenter un transistor NPN. C : collecteur - B : base - E : émetteur.

La figure 2-99 vous montre les quatre variantes du symbole d'un transistor PNP.

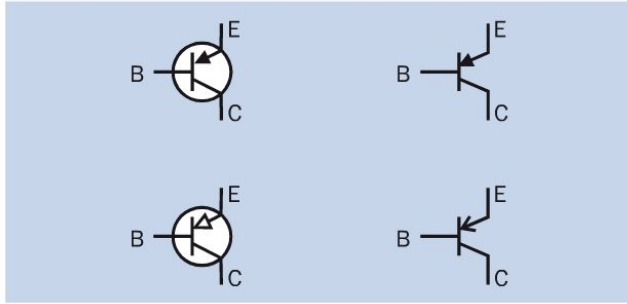


Figure 2-99. Symboles utilisés pour représenter un transistor PNP.

Il est facile de confondre les symboles des transistors NPN et PNP. Un moyen mnémotechnique simple vous aidera à vous rappeler auquel vous avez affaire : la flèche d'un transistor NPN pointe vers l'extérieur, jamais vers l'intérieur (« **N**ever **P**ointing in »).

Ajoutons un potentiomètre

Afin de mieux comprendre la façon dont un transistor fonctionne, nous devons utiliser un composant plus facilement contrôlable que le bout d'un doigt : un potentiomètre, mais pas un gros modèle comme celui déjà utilisé. Je choisis un *potentiomètre ajustable*, comme celui de la figure 2-22.

Même s'ils présentent des formes et des tailles différentes, ils possèdent tous trois broches de connexion, qui ont les mêmes fonctions que celles du gros modèle utilisé précédemment. La broche du milieu est toujours reliée au curseur interne d'un potentiomètre ajustable, alors que les deux autres sont reliées aux extrémités de la piste résistive interne. Voici une règle simple qu'il convient de toujours suivre : quand on insère un potentiomètre ajustable dans une plaque de montage, chaque broche doit être insérée dans une rangée de trous séparée des autres.

En haut de la figure 2-100, j'ai représenté trois types de potentiomètres ajustables, dont le type multi-tours bien que je ne le recommande pas. Leurs positions varient, mais il y a toujours trois broches qui sont espacées verticalement de 2,54 mm.

Dans la partie basse de la figure, les deux exemples marqués « OUI » fonctionneront car chaque broche est reliée à une rangée de trous différente. Les deux exemples marqués « NON » ne sont pas acceptables, car deux des broches sont reliées à la même rangée et court-circuitées par une barrette métallique interne.

Ajoutez un potentiomètre ajustable de 500K au circuit de votre transistor (figure 2-101). Reliez l'alimentation et utilisez un petit tournevis pour tourner votre potentiomètre au maximum dans le sens des aiguilles d'une montre, puis dans le sens inverse. Lorsque votre LED est éteinte, vous devrez revenir légèrement en arrière pour qu'elle commence à s'allumer faiblement.

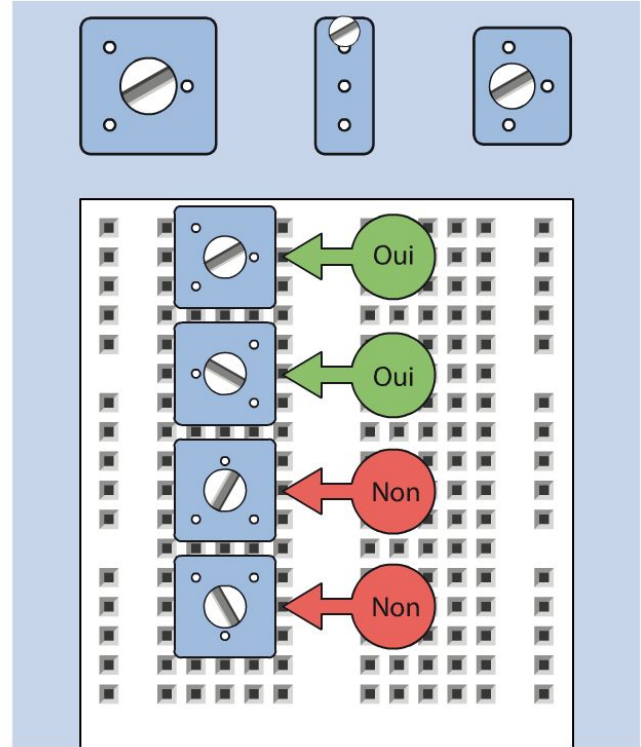


Figure 2-100. Orientation correcte pour trois types de potentiomètres ajustables.

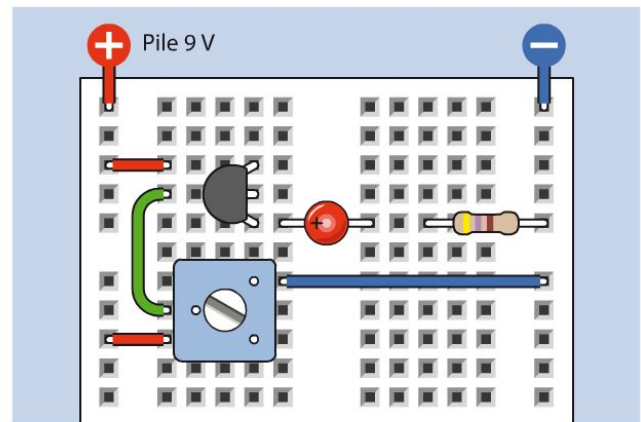


Figure 2-101. Le circuit est maintenant muni d'un potentiomètre ajustable, capable de contrôler le fonctionnement du transistor plus précisément qu'avec le bout du doigt.

Le schéma de la figure 2-102 montre le même câblage, mais dans un format plus compréhensible.

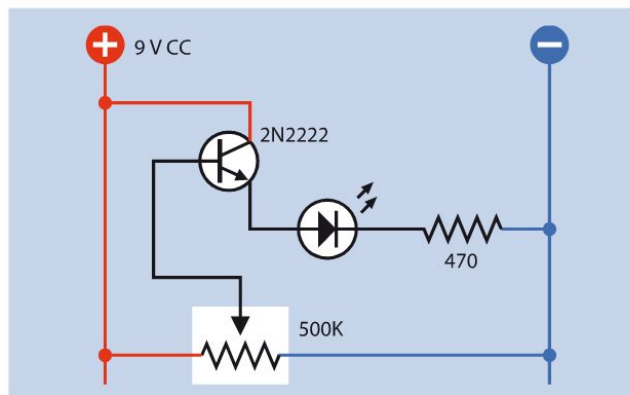


Figure 2-102. Représentation schématique du circuit de la figure 2-101.

Les valeurs des composants sont indiquées sur la figure 2-103.

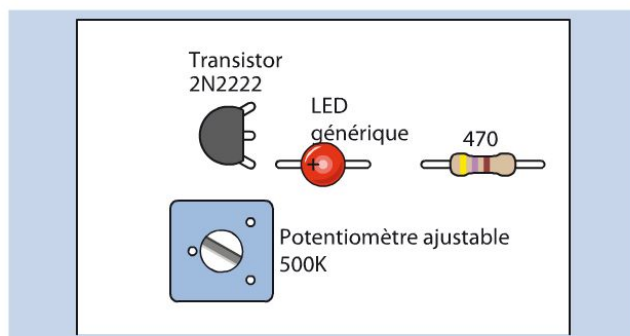


Figure 2-103. Valeurs des composants sur la plaque de montage.

Le potentiomètre est connecté entre le bus positif et le bus négatif de la plaque. Dans cette configuration, il s'agit d'un *diviseur de tension*. Quand le curseur est à une extrémité de la piste résistive, il est directement relié au pôle positif de l'alimentation ; s'il est placé à l'autre extrémité, il est directement relié au pôle négatif. Les positions intermédiaires servent à diviser la tension. Les potentiomètres sont souvent utilisés de cette façon, pour délivrer des tensions variées.

J'ai mentionné qu'au début, la LED ne s'allume pas lorsque vous déplacez le curseur du pôle négatif vers le positif. Est-ce parce qu'elle ne recevait pas assez de puissance ? Pas exactement. Le transistor bipolaire détourne un peu de la puissance à son profit pour assurer son rôle. Il ne répondra que si la tension de sa base est plus élevée que celle de son émetteur (aux environs de 0,7V). Dans ce mode, le transistor est *polarisé positivement* (figure 2-104).

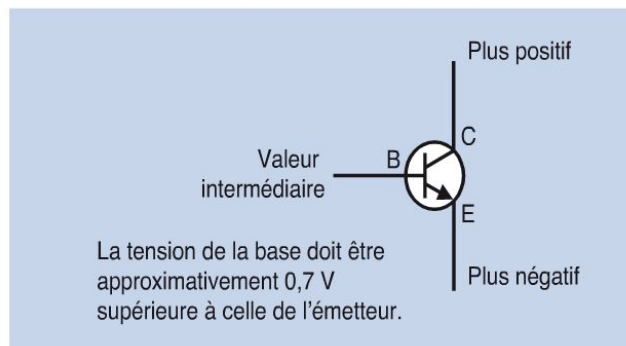


Figure 2-104. Règle de fonctionnement d'un transistor NPN.

Tension et intensité

Vous avez constaté que la tension de base d'un transistor bipolaire contrôle la sortie du transistor. Cela signifie-t-il que le transistor amplifie la tension ?

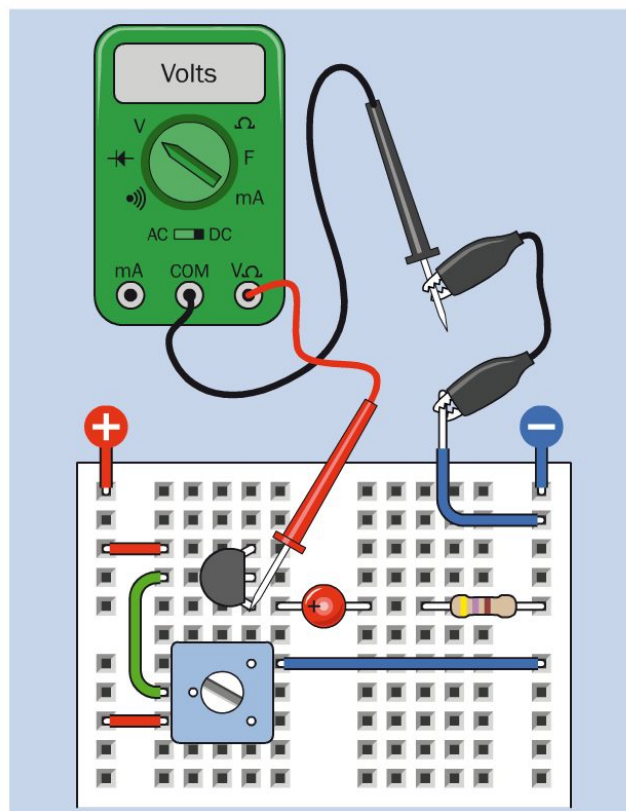


Figure 2-105. Test permettant de vérifier si un transistor amplifie la tension.

Vous pouvez le déterminer vous-même. Prenez votre multimètre, réglez-le pour la mesure des tensions en volts, puis utilisez un fil de test pour relier la pointe de

mesure noire au bus négatif de la plaque de montage (figure 2-105). Connectez la pointe rouge à l'émetteur du transistor, notez la tension, puis déplacez la pointe de touche rouge sur la base. La tension de l'émetteur sera certainement plus faible que celle de la base.

Réglez le potentiomètre sur une position différente et essayez à nouveau. Quelle que soit la tension que vous appliquez à la base, celle de l'émetteur sera inférieure.

Ceci peut-il s'expliquer par le fait que la résistance de $470\ \Omega$ ne s'oppose que faiblement au passage du courant entre l'émetteur et le bus négatif ? Pourrait-elle forcer la tension à zéro ?

Essayons de le savoir. Retirez la LED et la résistance de $470\ \Omega$, remplacez-les par une résistance de 1M entre l'émetteur et le bus négatif. Cela ne change rien : la tension de l'émetteur est toujours inférieure à celle de la base.

Si vous mesurez le courant entrant dans la base et qui vient de l'émetteur, vous obtiendrez un résultat tout à fait différent. Vous devez régler votre multimètre pour la mesure des milliampères et l'insérer dans le circuit à chaque point de mesure. Rappelez-vous que l'intensité doit passer par le multimètre pour être mesurée.

Voici ce que vous devriez trouver. Ce transistor amplifie le courant qui entre par sa base d'un facteur supérieur à 200:1. C'est la valeur bêta du transistor, qui me permet d'énoncer une propriété fondamentale : un transistor bipolaire amplifie le courant, pas la tension.

Le tome 2 de cet ouvrage revient plus largement sur cette notion.

Fondamentaux : tout sur les transistors NPN et PNP

Un transistor est un *semi-conducteur*, à mi-chemin entre un conducteur et un isolant. Sa résistance interne effective varie selon la tension qui est appliquée à sa base. Tous les transistors bipolaires sont munis de trois bornes : le collecteur (noté C), la base (B) et l'émetteur (E).

Les transistors NPN sont activés par une tension de base positive par rapport à l'émetteur.

Les transistors PNP sont activés par une tension de base négative par rapport à l'émetteur.

Dans leur état passif, ils bloquent le passage du courant du collecteur vers l'émetteur, juste comme un relais SPST dont les contacts sont normalement ouverts. En fait, un transistor permet toujours le passage d'un courant infime appelé *courant de fuite*.

Dans un schéma, l'orientation d'un transistor peut varier. L'émetteur peut être en haut et le collecteur en bas ou vice-versa. La base peut se trouver à gauche ou à droite, à discrétion du dessinateur. Observez bien le sens de la flèche du transistor afin de déterminer s'il s'agit d'un transistor NPN ou PNP. Vous pouvez endommager un transistor si vous le connectez incorrectement.

Les transistors sont disponibles dans de nombreuses configurations et dimensions. Pour de nombreux transistors, il est impossible de savoir quel fil est relié à l'émetteur, au collecteur ou à la base. Vous devez consulter la fiche technique du fabricant pour le savoir.

Si vous ne savez pas à quoi correspond chaque fil, de nombreux multimètres ont une fonction qui vous permet de l'identifier. En général, ils possèdent quatre trous marqués E, B, C et E. Si vous insérez le fil de l'émetteur de votre transistor dans un des trous E, le fil de la base en B et le fil du collecteur en C, le multimètre vous indiquera la valeur du coefficient bêta (gain en courant) du transistor. Pour tout autre sens de connexion, l'affichage du multimètre sera instable ou inexistant, ou zéro, ou une valeur nettement inférieure à ce qu'elle devrait être (à peu près toujours inférieure à 50, souvent moins de 5).



Transistor : attention, fragile !

Les transistors peuvent facilement être endommagés, et de façon permanente.

- *N'appliquez jamais une alimentation directement entre deux broches quelconques d'un transistor. Vous pourriez le griller par un courant trop élevé.*
- *Limitez toujours le courant qui circule du collecteur à l'émetteur d'un transistor en utilisant une résistance, de la même façon que vous protégez une LED.*
- *N'appliquez pas une tension inverse. Le collecteur d'un transistor NPN doit toujours être plus positif que la base, qui doit elle-même être plus positive que l'émetteur.*

Historique : les origines du transistor

Bien que certains historiens fassent remonter les origines du transistor à l'invention des diodes (qui permettent au courant électrique de circuler dans un sens tout en empêchant l'inversion du flux), le premier transistor réellement fonctionnel a été développé en 1948, par John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain, au sein des laboratoires Bell. Shockley était le meneur de l'équipe ; il comprenait intuitivement tout le potentiel du commutateur à semi-conducteur. Bardeen était le théoricien et Brattain le praticien. Leur collaboration fut extrêmement productive, jusqu'à sa réussite. Toutefois, Shockley essaya de breveter le transistor sous son seul nom, ce qui décû ses collaborateurs.

Une photo largement diffusée a contribué à aviver les tensions. Elle montrait Shockley au centre, assis devant un microscope, comme s'il avait effectué tout le travail pratique, tandis que ses deux collègues se tenaient debout, derrière lui, comme si leur rôle avait été secondaire. Cette photo a fait la couverture du magazine *Electronics* (figure 2-106). En réalité, Shockley n'était que rarement présent au laboratoire où le travail a été réellement effectué.

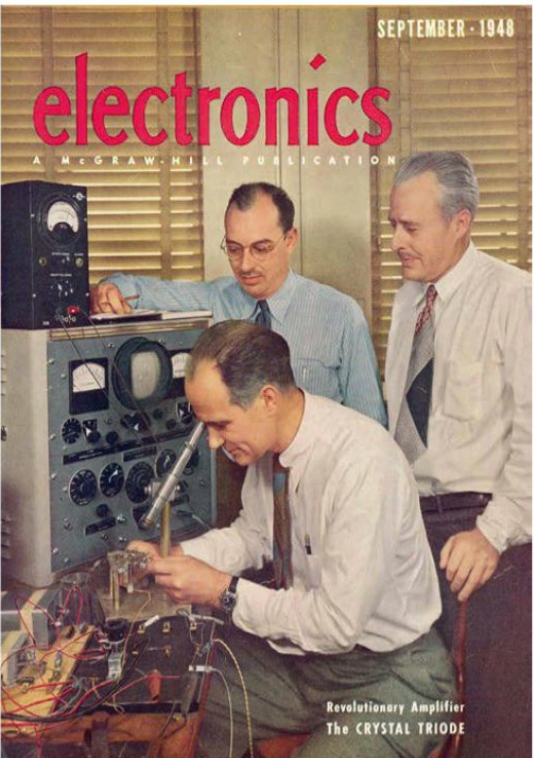


Figure 2-106. Au premier plan, William Shockley, et derrière, de gauche à droite, John Bardeen et Walter Brattain. Pour avoir mis au point le premier transistor fonctionnel, ils reçurent le prix Nobel en 1956.

La collaboration entre les trois scientifiques s'arrêta rapidement. Brattain demanda à être transféré vers un autre laboratoire d'AT&T. Bardeen poursuivit ses recherches en physique théorique à l'université de l'Illinois. Shockley finit par quitter les laboratoires Bell pour fonder Shockley Semiconductor dans la future Silicon Valley, mais ses ambitions dépassaient les capacités technologiques de l'époque et son entreprise ne fabriqua aucun produit rentable.

Huit collaborateurs de Shockley ont fini par le quitter et par créer leur propre entreprise, Fairchild Semiconductor, qui a connu un immense succès en tant que fabricant de transistors et, par la suite, de puces de circuits intégrés.

Fondamentaux : transistors et relais

Une des contraintes des transistors NPN et PNP est qu'ils imposent d'être alimentés pour fonctionner, contrairement à un relais, qui peut être à l'état ouvert ou fermé en l'absence de toute alimentation.

Les relais offrent également plus de possibilités de commutation. Les différents types peuvent être normalement ouverts, normalement fermés ou être verrouillés dans l'un de ces deux états. Un relais peut contenir un inverseur permettant deux positions à contact fermé. Il peut aussi contenir deux pôles pouvant fermer (ou ouvrir) deux connexions différentes. Un transistor unique ne peut pas offrir d'inverseur ou plusieurs pôles ; toutefois, on peut réaliser des circuits plus complexes qui simulent ce comportement.

La figure 2-107 présente un tableau comparatif des propriétés d'un transistor et de celles d'un relais. Le choix d'utiliser l'un ou l'autre composant dépendra de chaque application.

	Transistor	Relais
Grande fiabilité	Excellent	Limité
Peut être inverseur ou à double pôle	Non	Oui
Peut interrompre des intensités élevées	Limité	Oui
Peut commuter du courant alternatif	Normalement non	Oui
Peut être commandé par une tension alternative	Normalement non	En option
Permet la miniaturisation	Excellent	Très limité
Peut commuter à très grande vitesse	Oui	Non
Coût réduit pour la commutation de tensions ou intensités élevées	Non	Oui
Coût réduit pour la commutation de tensions ou intensités faibles	Oui	Non
Courant de fuite en état non conducteur	Oui	Non

Figure 2-107. Comparaison des principales propriétés des relais et des transistors.

Expérience 11 : son et lumière

Voici votre premier projet avec un vrai rôle fonctionnel. Il va aboutir à la réalisation d'un synthétiseur sonore très simple.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque de montage, du fil de câblage, la pince coupante, la pince à dénuder, des fils de test et un multimètre
- 1 pile de 9 V et son connecteur
- Résistances : 470 Ω (2), 1K (1), 4,7K (4), 100K (2), 220K (2), 470K (4)
- Condensateurs : 0,01 μ F (2), 0,1 μ F (2), 0,33 μ F (2), 1 μ F (1), 3,3 μ F (2), 33 μ F (1), 100 μ F (1), 220 μ F (1)
- 1 transistor 2N2222
- 1 LED générique
- 1 haut-parleur de 8 Ω de diamètre 2,5 cm ou 5 cm (de préférence)

Fluctuations

La figure 2-108 montre le nouveau circuit à réaliser sur votre plaque de montage. Comme les composants sont assez serrés, il sera plus facile de les insérer à l'aide de votre pince plate. Comptez soigneusement les trous de la plaque et revérifiez que tout est correctement inséré à la bonne position.

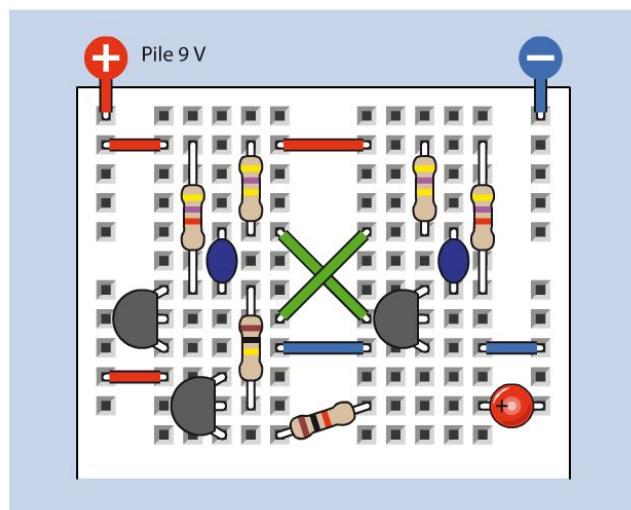


Figure 2-108. Plan du circuit oscillateur.

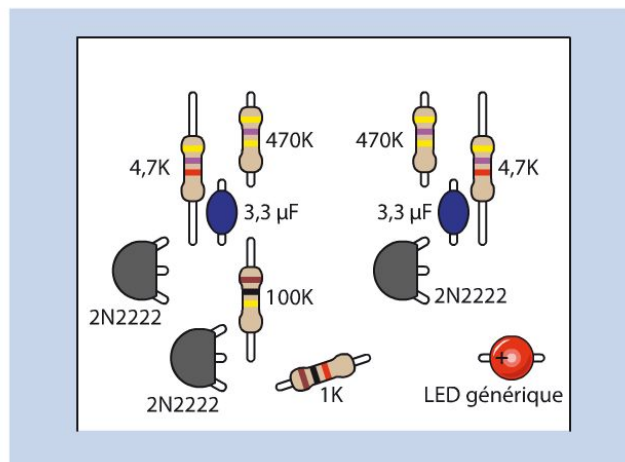


Figure 2-109. Valeurs des composants sur la plaque de montage.

Après la mise sous tension, la LED devrait s'allumer pendant 1 s, puis s'éteindre pendant 1 s.

En premier lieu, vous devez comprendre comment cela fonctionne. Observez attentivement le plan (figure 2-110) et le schéma correspondant (figure 2-111) si vous éprouvez des difficultés à visualiser la façon dont les composants sont reliés à l'intérieur de la plaque d'essai.

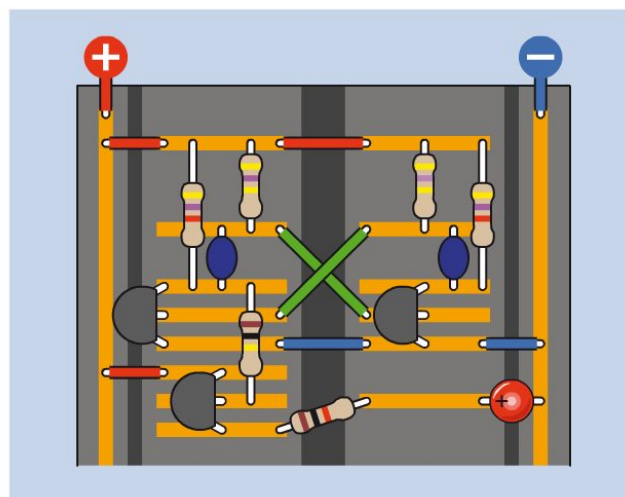


Figure 2-110. Cette vue en transparence devrait vous aider à déterminer les interconnexions entre les différents composants.

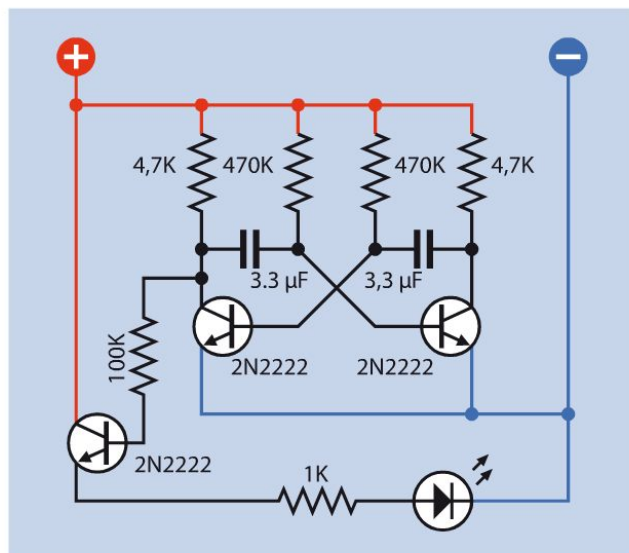


Figure 2-111. Représentation schématique du circuit.

En tout premier lieu, vous devriez remarquer qu'il y a une sorte de symétrie. Est-ce que cela signifie que la moitié gauche remplit la même fonction que la moitié droite ? Oui, mais pas en même temps. En effet, une moitié allume la LED et l'autre moitié provoque son extinction.

Ce phénomène est délicat à analyser, car les tensions varient sans cesse et plusieurs actions interviennent simultanément. Les quatre instantanés ci-après montrent le fonctionnement à plusieurs intervalles de temps, cela devrait vous aider à comprendre l'explication.

Dans chaque vue, le troisième transistor et la LED ont disparu, car ils n'ont aucun rôle dans l'oscillation du circuit.

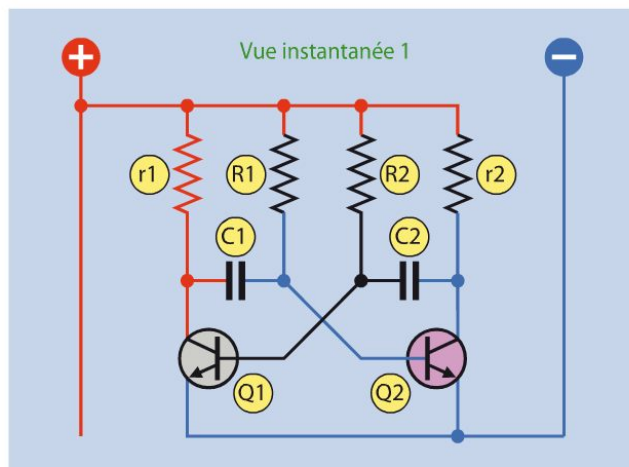


Figure 2-112. Première vue instantanée : les tensions dans le circuit clignotant de la LED.

Voici les correspondances de couleurs dans le circuit :

- Les connexions et les composants en noir ont une tension inconnue ou indéterminée.
- Les connexions en bleu ont une tension proche de zéro volt.
- Les conducteurs rouges ont une tension qui croît vers la tension d'alimentation positive.
- Les conducteurs blancs ont un potentiel qui chute brièvement (à un niveau inférieur à celui du pôle négatif de l'alimentation), pour une raison que je vais expliquer par la suite.
- Un transistor de couleur grise ne laisse pas passer le courant de son collecteur vers son émetteur. Vous pouvez le considérer comme « ouvert ».
- Un transistor rose est conducteur.
- Les transistors sont identifiés Q1 et Q2. C'est la façon usuelle d'identifier les semi-conducteurs car, en vue du dessus, le petit ergot qui dépassait des anciens transistors en boîtier métallique les faisait ressembler à la lettre Q.

Afin de distinguer les deux parties du circuit, r1 et R1 sont à gauche, r2 et R2 à droite. Les lettres minuscules identifient les résistances de la plus petite valeur.

Voici une dernière recommandation, avant de commencer les explications. Gardez à l'esprit le comportement fondamental d'un transistor :

- Quand le courant de base le rend conducteur, sa résistance interne devient très basse. En conséquence, si son émetteur est relié à la masse (environ 0 V), son collecteur sera également porté à une tension voisine de 0 V, ainsi que tout composant directement relié au collecteur. La tension de base peut également être relativement basse, tout en n'étant pas aussi faible que celle de l'émetteur. Vous verrez quand cela arrive, dans la seconde vue instantanée.
- Quand il ne conduit plus, la résistance interne apparente du transistor s'élève au minimum à 5K. En conséquence, tout composant relié à son collecteur n'est plus mis à la masse par le transistor et peut accumuler une charge.

Pas à pas

Commençons à un temps arbitraire, alors que le circuit est déjà en fonctionnement. Ensuite, je passerai en revue la succession des événements qui se produisent, puis je conclurai par la façon dont l'oscillation initiale s'établit.

Dans la vue instantanée 1, Q1 vient juste de quitter son état de conducteur et c'est Q2 qui laisse maintenant passer le courant. L'extrémité inférieure de r1 était auparavant mise à la masse par Q1, mais maintenant, la tension de son collecteur commence à augmenter, ce qui élève la tension de connexion gauche de C1.

La tension de base de Q1 commence également à augmenter, mais pas aussi rapidement, car R2 est de valeur plus élevée. Pendant ce temps, puisque Q2 est conducteur, il absorbe le courant issu de r2, faisant ainsi chuter la tension de son collecteur. La base de Q2 absorbe également du courant qu'elle écoule vers la masse, au travers du transistor.

Dans la seconde vue instantanée (figure 2-113), la tension de la base de Q1 a suffisamment augmenté pour qu'il commence à devenir conducteur. Il absorbe maintenant du courant venant de C1 ainsi que de sa base ; c'est pourquoi ses fils sont maintenant bleus. Le changement soudain de la tension de la connexion gauche de C1 transmet une chute de tension identique à sa connexion droite, en raison de l'effet du champ électrique que l'on peut aussi considérer comme un déplacement de courant (décrit dans l'expérience 9). Cela rend la tension de la partie droite de C1 inférieure à zéro, représentée par le fil blanc. Ceci provoque immédiatement la coupure de Q2 en lui imposant une polarisation négative de sa base.

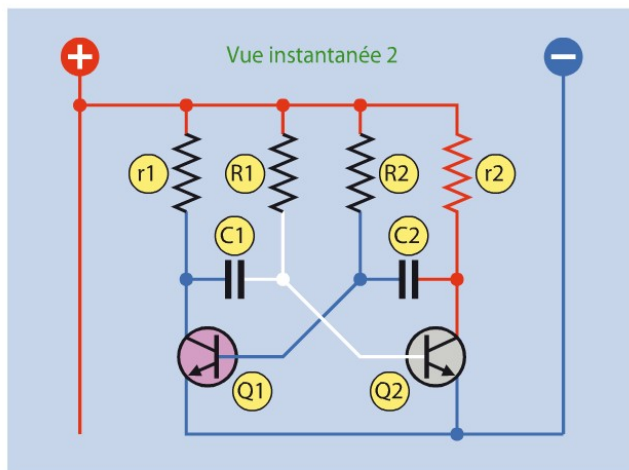


Figure 2-113. Seconde vue instantanée.

Dans la troisième vue (figure 2-114), Q1 est toujours conducteur alors que Q2 est bloqué. C'est l'image miroir de la situation de la vue 1. C1 commence à se charger en sens inverse, au travers de R1. Cela augmente progressivement la tension de la base de Q2.

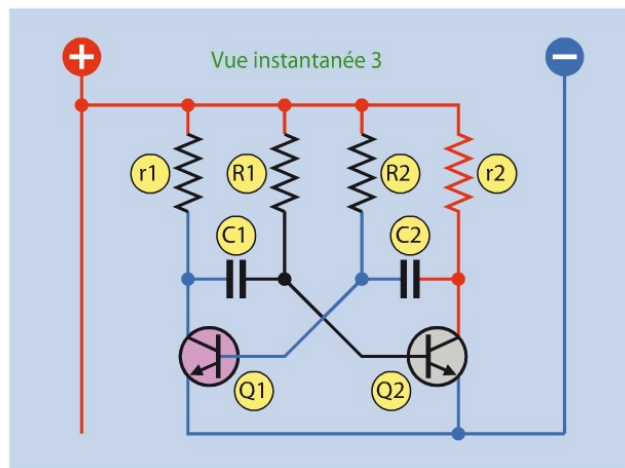


Figure 2-114. Troisième vue instantanée.

Dans la quatrième vue (figure 2-115), Q2 commence à conduire, mettant à la masse le côté droit de C2. Cette transition abaisse la tension du côté gauche de C2 à une valeur inférieure à zéro et provoque le blocage de Q1 en mettant sa base à la masse. C'est l'image miroir de la vue 2.

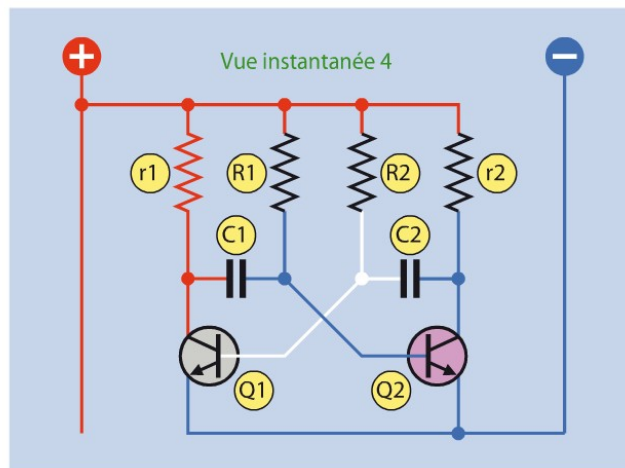


Figure 2-115. Quatrième vue instantanée. Ensuite, la séquence se répète.

Après la quatrième vue, la séquence se répète par la vue 1. Si le transistor supplémentaire et la LED sont connectés comme sur la figure 2-111, la LED devrait s'allumer dans les vues 1 et 4.

Le condensateur de couplage

Comme vous pouvez le constater, l'oscillateur est difficile à comprendre, mais c'est un circuit très utilisé.

La clé se trouve dans les vues 2 et 4 : une chute soudaine de la tension d'un côté d'un condensateur transmet une chute de tension égale de l'autre côté – c'est l'effet de couplage déjà observé dans l'expérience 9.

Comment débute l'oscillation ?

Gardez à l'esprit que le circuit est symétrique. Lorsque vous le mettez sous tension, pourquoi les deux transistors ne seraient-ils pas conducteurs ou bloqués simultanément ?

Dans un univers parfait, où deux transistors – ou deux résistances – seraient absolument identiques, le circuit symétrique ne s'initialiserait pas de lui-même. En réalité cependant, il existe toujours une petite différence de fabrication qui force un transistor à conduire le courant avant l'autre. Dès que cela intervient, le circuit n'est plus à l'équilibre et il commence à osciller selon le fonctionnement décrit.

Une autre explication est nécessaire, sur la façon dont j'ai décidé de prélever la sortie du circuit oscillateur. Dans le circuit original, remarquez que r_1 et r_2 ont une plus petite valeur que R_1 et R_2 . Ceci permet au côté gauche de C_1 de se charger rapidement et d'atteindre la presque totalité de la tension d'alimentation – et il en est de même pour le côté droit de C_2 . Nous disposons donc d'une grande amplitude de tension à l'un ou l'autre de ces points du circuit. J'ai choisi celui de la partie gauche, simplement parce que cela simplifiait le positionnement des autres composants sur le schéma.

Si un courant trop important est prélevé sur le circuit, la charge du condensateur est ralentie, ce qui affecte l'équilibre et le minutage de l'oscillateur. Cependant, je transmets ce signal à la base d'un autre transistor, par l'intermédiaire d'une résistance de 100K. La base de ce transistor va donc absorber un courant très faible et l'amplifiera afin qu'il soit utilisable.

Pourquoi cette complexité ?

Dans la première édition de ce livre, j'ai proposé un projet de LED clignotante utilisant un composant nommé *Transistor Unijonction Programmable* (PUT pour *Programmable Unijunction Transistor*). Son fonctionnement est beaucoup plus facile à comprendre et un seul de ces composants est nécessaire pour obtenir un résultat. Toutefois, les PUT ne sont plus très utilisés et certains lecteurs se sont plaints de ne pas pouvoir les acheter facilement, d'autres disant qu'un montage utilisant un transistor unijonction faisait vieille école.

En réalité, il est toujours possible d'acheter de tels transistors, mais ils sont quasiment obsolètes. Les transistors bipolaires, eux, sont toujours très utilisés. Le schéma qui a été retenu ici est le plus commun, mais les circuits oscillants restent difficiles à comprendre.

Traitement de l'impulsion

Vous venez d'apprendre que deux transistors pouvaient générer un signal impulsionnel variant du niveau haut au niveau bas et qu'un troisième transistor pouvait l'amplifier pour allumer une LED. Vous pouvez revenir brièvement aux expériences précédentes. Qu'avez-vous appris d'utile pour celle-ci ?

Nous avons une sortie qui fluctue relativement lentement. En y ajoutant un réseau RC (voir la section « Réseau RC » page 71), le circuit peut devenir plus intéressant. Examinez la figure 2-116 où le nouveau réseau RC est en bas.

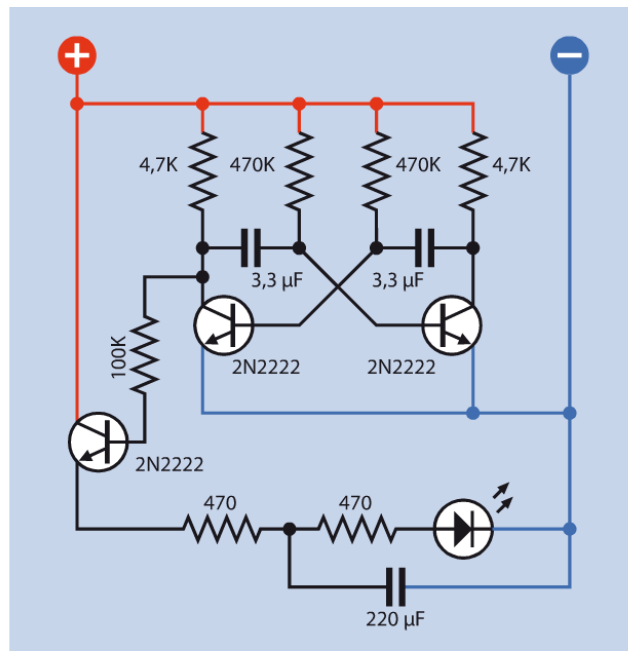


Figure 2-116. Le schéma précédent a été modifié en ajoutant une résistance et un condensateur de 220 µF en bas de la figure, formant ainsi un réseau RC.

Sur la figure 2-117, les composants qui ont été ajoutés ou repositionnés sont colorés, en bas et à droite, tandis que les composants qui n'ont pas été modifiés sont en gris.

Désormais, si vous mettez le circuit sous tension, la LED oscille progressivement, au lieu de s'allumer et s'éteindre totalement. En effet, le condensateur se charge en passant

par la résistance de $470\ \Omega$, puis se décharge à travers la seconde. Qu'en résulte-t-il ? Supposons que vous souhaitiez réaliser une sorte de bijou électronique. Pouvoir ajuster la façon dont il clignote ou varie, peut être une caractéristique esthétique importante.

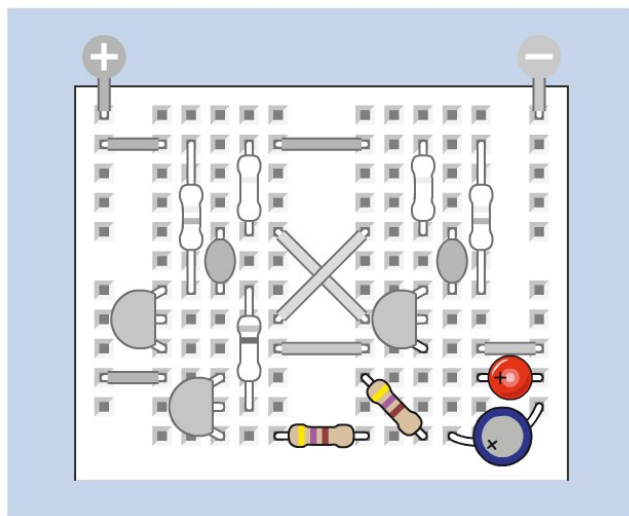


Figure 2-117. Les composants colorés ont été ajoutés ou repositionnés. Le condensateur ajouté est un $220\ \mu\text{F}$ électrolytique.

Augmentons la vitesse

Que pouvez-vous faire d'autre avec ce circuit ? Vous pourriez facilement modifier sa vitesse. Retirez les deux condensateurs de $3,3\ \mu\text{F}$ et remplacez-les par deux de $0,33\ \mu\text{F}$. Ils devraient se charger 10 fois plus rapidement ; la LED devrait donc clignoter 10 fois plus rapidement.

Que se passerait-il si vous réduisiez encore davantage leur valeur, à $0,01\ \mu\text{F}$ par exemple ? Au-delà de 50 clignotements par seconde, vous passez d'une fréquence où les clignotements sont seulement visibles à une situation où ils deviennent audibles.

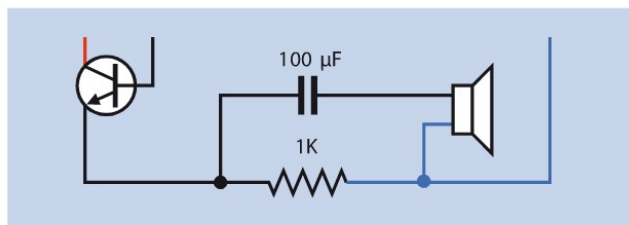


Figure 2-118. Modification du circuit pour une sortie sonore.

Comment pourriez-vous modifier la sortie de ce circuit pour qu'elle soit audible ? Retirez la LED, la résistance de $470\ \Omega$ et le condensateur de $220\ \mu\text{F}$. Remplacez-les par un petit haut-parleur, un condensateur de couplage de $100\ \mu\text{F}$ et une

résistance de 1K (figure 2-118). La résistance met à la masse l'émetteur du transistor, car un transistor ne fonctionne que si son émetteur a une tension d'émetteur inférieure à sa tension de base. Le condensateur bloque le passage de la composante en courant continu du signal, tout en permettant aux pulsations alternatives de le traverser.

Autres modifications

Maintenant que vous obtenez un son, comment le rendre plus aigu ? Remplacez les condensateurs et les résistances du circuit oscillant par des composants de valeurs plus petites. Vous pourriez remplacer les résistances de 470K par des 220K (ou une valeur intermédiaire). Les transistors sont capables de commuter un signal plus d'un million de fois par seconde ; vous n'allez probablement pas dépasser leurs limites en faisant osciller votre circuit plus rapidement. Un signal qui oscille 10 000 fois par seconde est extrêmement aigu. Si vous le poussez à 20 000 périodes par seconde, c'est au-delà de la limite audible pour l'oreille humaine.

Et comment changer le timbre sonore ?

Dans la moitié supérieure de la figure 2-119, j'ai remplacé le condensateur de couplage de $100\ \mu\text{F}$ placé en série avec le haut-parleur par un condensateur de $1\ \mu\text{F}$. La valeur plus faible de ce condensateur ne permettra que la transmission des fréquences hautes (impulsions courtes), ce qui privera le son de certaines de ses composantes graves.

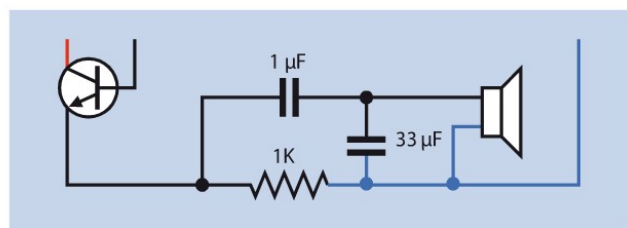
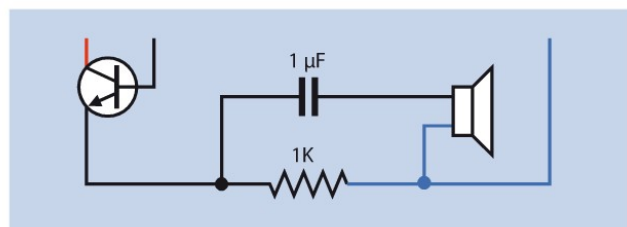


Figure 2-119. Le remplacement du condensateur de couplage par une valeur plus petite bloque les fréquences les plus basses ; seules les fréquences élevées peuvent être entendues. Un condensateur placé en parallèle avec le haut-parleur évacue les fréquences élevées vers la masse. Vous n'entendez plus que les fréquences les plus basses.

Que se passe-t-il si vous ajoutez un condensateur en parallèle avec le haut-parleur, comme sur la figure 2-119 ? C'est l'effet inverse qui se produit, car le condensateur transmet toujours les fréquences élevées, mais il les entraîne vers la masse en évitant le haut-parleur. Dans cette configuration, il s'agit d'un *condensateur de découplage* (*bypass en anglais*).

Ces modifications sont simples. Si vous êtes un peu plus ambitieux, vous pouvez dupliquer le circuit et utiliser une partie pour agir sur l'autre.

Remettez les composants originaux en place, selon la figure 2-109, afin que le circuit oscille à la fréquence originale. Utilisez alors sa sortie pour alimenter la partie dupliquée située en dessous et qui utilise des condensateurs de $0,01\ \mu\text{F}$, afin de générer une fréquence audible (figure 2-120). La partie que vous avez réalisée précédemment est représentée en gris et la section audio est en bas de la plaque.

Le cavalier marqué A a été repositionné de telle sorte que, maintenant, le circuit est alimenté par la sortie de la partie haute. Les fils de pontage marqués B ont été ajoutés afin de joindre les parties isolées des bus de votre platine de montage.

Et que se passerait-il si vous preniez un condensateur de $220\ \mu\text{F}$ et le connectiez à la masse d'un côté et en différents points du circuit de l'autre (de la moitié supérieure ou de la moitié inférieure) ? Vous pouvez faire l'essai sans crainte d'endommager les composants.

Une autre possibilité consiste à revenir à la partie « traitement de l'impulsion » lumineuse de la figure 2-116 et modifier la façon dont les composants sont interconnectés. Vous pourriez, par exemple, les retirer de la plaque de montage et les réassembler sous la forme d'un petit objet d'habillement.

Dans l'expérience 14, vous verrez comment procéder après avoir appris à souder les composants (expérience 12).

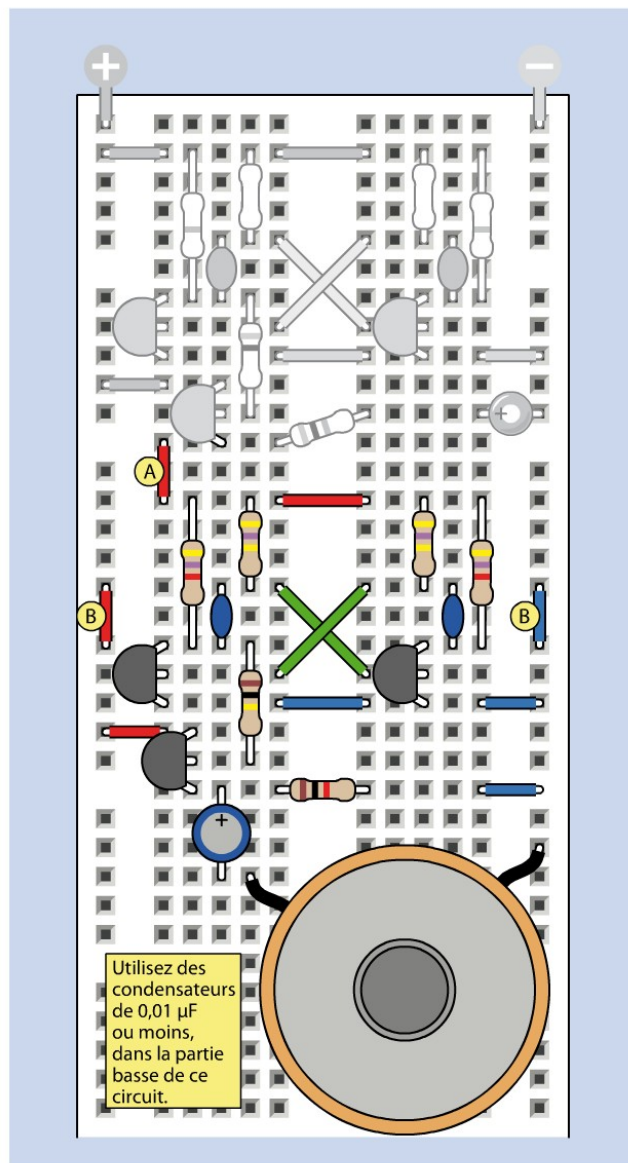


Figure 2-120. Le contrôle de la section audio du circuit par la sortie de l'oscillateur lent permet d'obtenir un son de puissance variable.

Que se passe-t-il maintenant si vous changez les valeurs des condensateurs ou des résistances de la moitié haute du circuit, afin de contrôler la partie inférieure plus rapidement ?

Technique : montage d'un haut-parleur

Le *diaphragme* d'un haut-parleur, également appelé *cône*, est chargé de diffuser le son. Comme il oscille d'avant en arrière, il émet le son de face comme de dos. Or, puisque ces sons sont en opposition de phase, ils ont tendance à s'annuler réciproquement.

La perception du volume diffusé par un haut-parleur peut être fortement accentuée en entourant ce composant d'un pavillon acoustique formé par un tube, qui concentre les vibrations émises de face. Pour un haut-parleur miniature de 2,5 cm, vous pouvez replier et coller une grande carte postale autour (figure 2-121).

Ou mieux, vous pouvez l'installer dans une boîte percée de trous pour permettre aux sons provenant de la face d'être diffusés, alors que les sons émis par l'arrière du haut-parleur sont absorbés par la boîte hermétique.

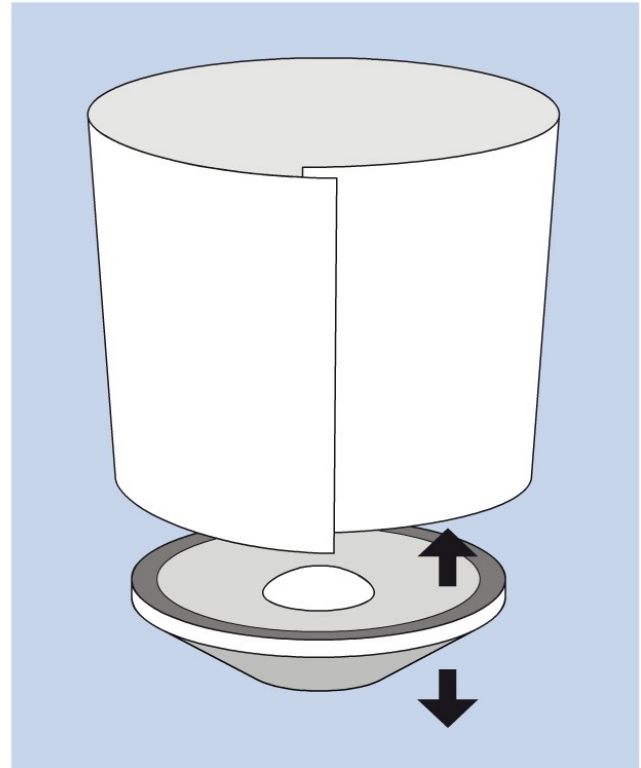


Figure 2-121. Un tube en carton accroît la sensation du volume diffusé par un haut-parleur.

Notions plus avancées

3

Ce troisième chapitre met en application ce que vous avez appris jusqu'à présent dans quelques projets élaborés. Je vais vous montrer comment réaliser une version vestimentaire de la lumière pulsée de l'expérience 11 et vous allez suivre les étapes du développement d'un système d'alarme anti-intrusion.

Matériel du chapitre 3

Comme précédemment, référez-vous au chapitre 6 pour acheter équipement, outils et composants.

Équipement et outils

Essentiel : l'alimentation secteur

Vous pourriez continuer à utiliser une pile de 9V pour tous les projets de ce livre, mais je considère qu'un *adaptateur secteur* est essentiel, car beaucoup plus pratique. Il vous reviendra également moins cher que l'achat de piles et vous allez commencer à réaliser des circuits qui consomment davantage de puissance.

Pour convertir le secteur alternatif d'une prise de courant de votre habitation, vous avez trois possibilités :

- Un *adaptateur universel* (figure 3-1) est la solution la plus souple. Il délivre une gamme de tensions de sortie sélectionnables de 3 V, 4,5 V ou 5 V, 6 V, 9 V et 12 V. Les adaptateurs universels sont prévus pour alimenter des petits matériels tels que les enregistreurs sonores, les téléphones et les petits diffuseurs multimédia. Ils ne délivrent pas toujours une tension très précise et filtrée, mais vous pourrez en filtrer la sortie à l'aide de condensateurs, comme je l'expliquerai lorsque nous aborderons un projet utilisant cet adaptateur.



Figure 3-1. Cet adaptateur se branche sur une prise murale et offre un choix de tensions de sortie par le déplacement d'un petit commutateur.

- Vous avez également la possibilité d'acheter un *adaptateur à tension de sortie unique* qui délivre 9 V (figure 3-2). Lorsque vous entamerez l'utilisation des circuits intégrés logiques, qui nécessitent une alimentation de 5 V, vous pourrez convertir la tension de 9 V à l'aide d'un petit composant économique appelé *régulateur de tension*.



Figure 3-2. Adaptateur secteur délivrant une tension continue de valeur fixe de 9 V.

- La troisième possibilité qui vous est offerte vous fera dépenser un peu plus en achetant une *alimentation de laboratoire* qui délivre une tension continue variable entre 0 V et +15 V et entre 0 V et -15 V, ou une tension fixe de 5 V. Elle pourrait également être munie de plusieurs plaques de montage sur son coffret. Cela vous sera sans aucun doute très utile si vous continuez vos travaux électroniques.

Quel que soit le matériel acheté, il devra posséder les caractéristiques suivantes :

- La sortie doit être en courant continu CC, pas en CA. Pratiquement tous les adaptateurs secteur délivrent une tension continue, mais on rencontre quelques exceptions.
- Leur puissance doit autoriser une intensité de sortie au minimum égale à 500 mA.
- Peu importe le type de la fiche fournie au bout du câble de sortie, puisque vous devrez la retirer.
- De même, si un adaptateur universel offre plusieurs types de fiche de sortie, n'y prêtez pas attention, car vous ne les utiliserez pas.
- Un adaptateur secteur très bas de gamme peut se révéler peu fiable s'il doit fournir une intensité atteignant ses limites. En France, exigez un modèle marqué CE.

Essentiel : un fer à souder de petite puissance

Alors qu'une plaque de montage est indispensable pour assembler rapidement un circuit et comprendre comment il fonctionne, un *fer à souder* est nécessaire pour réaliser de façon permanente les connexions d'un circuit que l'on souhaite conserver. Un fer à souder permet de faire fondre un petit fil en alliage métallique appelé *soudure*, jusqu'à ce qu'il forme une goutte autour de fils ou composants à relier. Quand la soudure refroidit, la liaison devient permanente.

Vous ne devez pas disposer absolument d'un fer à souder. Vous pouvez assembler tous les projets de ce livre à l'aide d'une plaque de montage. Néanmoins, il est toujours agréable de construire quelque chose de façon durable et savoir souder est un atout très utile. C'est pourquoi j'ai classé les fers à souder dans les « essentiels ».

Il peut être nécessaire d'avoir deux fers à souder : un pour les travaux de précision, réservé aux composants fragiles et un autre fer à usage général. Un fer à souder contrôlé thermiquement peut être pratique, mais il risque de ne pas être adapté à tous les types de travaux et il est plus onéreux.

La puissance d'un fer à souder de petite taille est d'environ 15 W ; plus il est petit, plus il est facile à manipuler. Son extrémité (la panne) devrait être fine et ronde, à l'image d'un crayon fraîchement taillé. Une panne plaquée d'un métal inoxydable est préférable, mais le fabricant n'indique pas toujours si c'est le cas. La figure 3-3 montre un fer à souder usuel de 15 W. La décoloration du corps du fer est la conséquence normale de l'échauffement et ne nuit pas à son efficacité.



Figure 3-3. Fer à souder de 15 W adapté aux travaux électroniques délicats.

Essentiel : fer à souder à usage général

La capacité thermique limitée d'un fer à souder de 15 W sera insuffisante si vous devez relier des fils de gros diamètre, particulièrement sur les composants tels que les gros interrupteurs dont les cosse sont prévues pour supporter un courant élevé. Les broches peuvent absorber la chaleur si rapidement qu'un fer à souder de faible puissance serait incapable de générer une chaleur suffisamment élevée pour faire fondre la soudure. Vous pourriez rencontrer le même problème en essayant de relier un fil à une cosse d'un potentiomètre de taille normale.

Dans ces situations, vous aurez besoin d'un fer à souder de puissance 30 W ou 40 W. Toutefois, cela ne sera pas nécessaire pour la plupart des projets de ce livre. Je vous le recommande pour réaliser vos premières soudures, car la plus forte capacité calorifique facilitera l'opération. Un fer à souder de 30 W est en général moins coûteux qu'un fer de 15 W et représente une dépense additionnelle minime. Une panne en forme de pointe de burin permet un meilleur transfert de la chaleur et, du fait que vous n'utiliserez pas ce fer pour des travaux délicats, une panne en forme de pointe n'est pas nécessaire.

Terminologie technique de la soudure

Certains fers sont équipés d'une pompe à dessouder, afin de vous faciliter la suppression des points de soudure. C'est un piston que vous tirez avec vos doigts pour absorber l'air au travers de la panne du fer à souder. Je ne trouve pas que l'aspiration est efficace. Dans tous les cas, je ne l'ai vu que sur des fers de 30 W, trop puissants pour un usage en électronique.

Un fer à souder peut indiquer « soudobrasage », dans sa description. Vous pouvez ignorer ce terme inapproprié, car les fers à souder n'ont jamais permis le soudobrasage.

Certains fers à souder sont fournis avec une *troisième main*, un dispositif qui vous permet de maintenir des petits objets pendant que vous les soudez. Cette combinaison est intéressante, car elle coûte, en général, moins cher que si vous achetez les éléments séparément. Ce dispositif de troisième main est décrit ci-après.

Si un fer à souder est vendu avec un peu de fil de soudure, n'utilisez pas ce fil, à moins qu'il ne soit explicitement prévu pour la soudure électrique et muni d'une *âme de flux décapant*.

De nombreux fers à souder sont dits de type crayon. Le terme n'est pas très informatif, car il peut s'appliquer tout aussi bien à un fer de 15 W qu'à un de 30 W. En revanche, il se distingue d'un fer à souder pistolet (figure 3-4). Certaines personnes préfèrent l'ergonomie de ce type de fer ; dans ce cas, le Thermo-Boost est un excellent appareil pour débiter, car il atteint sa température de travail en moins d'une minute, ce qui le rend intéressant pour tous les impatientes. Néanmoins, les fers à souder pistolets sont tous d'une puissance de 30 W ou supérieure et beaucoup plus chers que les fers à souder crayons traditionnels.



Figure 3-4. Le fer à souder Weller Thermo-Boost 30 W est pratique pour souder les fils et les composants les plus gros.

Essentiel : la troisième main

Le dispositif appelé *troisième main* possède deux pinces crocodiles pouvant maintenir des composants ou des fils à une position précise pendant que vous les soudez. Certains modèles sont équipés d'une petite loupe, d'un support de fer à souder en forme de spirale et d'une petite éponge pour nettoyer l'extrémité de la panne du fer (figure 3-5). Ces éléments optionnels sont pratiques, mais pas indispensables.



Figure 3-5. Dispositif troisième main muni d'accessoires additionnels.

Essentiel : loupe grossissante



Figure 3-6. Loupe grossissante portable, essentielle pour observer les points de soudure.

Quelle que soit votre acuité visuelle, une petite loupe grossissante portable est indispensable pour vérifier les soudures sur une plaque d'essais perforée. Le modèle à trois lentilles de la figure 3-6 est prévu pour être placé près de l'œil ; il est beaucoup plus puissant que la loupe du dispositif troisième main. La loupe pliante de la figure 3-7 se place sur la surface de travail pour garder les mains libres. Les deux se trouvent notamment dans les magasins de modélisme. Les loupes en plastique sont acceptables, mais plus fragiles.

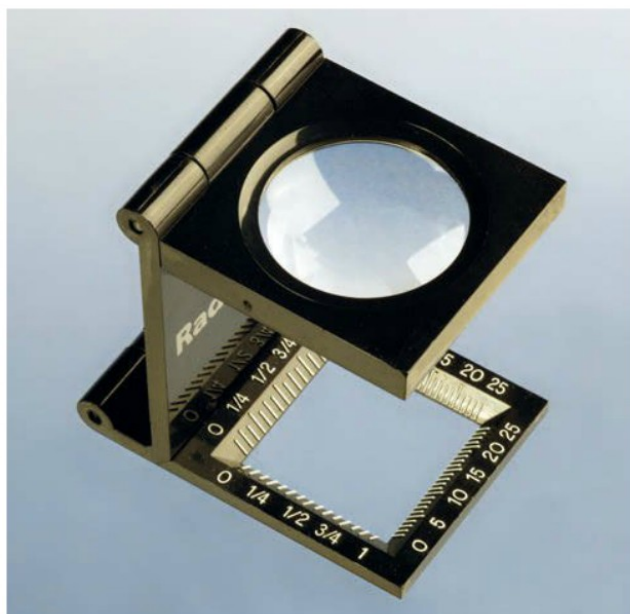


Figure 3-7. Ce type de loupe pliante (compte-fils) se pose sur votre surface de travail.

Optionnel : cordons de mesure avec clips

Vous pouvez acheter des cordons de mesure équipés de *grip-fils minigrabbers* à leur extrémité. C'est une solution alternative plus élégante que celle suggérée au précédent chapitre. Le modèle POMONA 6244-48-0 (figure 3-8) ou son équivalent conviendra. C'est en revanche une solution plus coûteuse. Vous préférerez peut-être des cordons de mesure se terminant par une petite pince crocodile (figure 3-9). C'est, en général, la solution la plus économique. Vous pouvez aussi continuer tout simplement à utiliser les fils de test comme je suggérais précédemment.

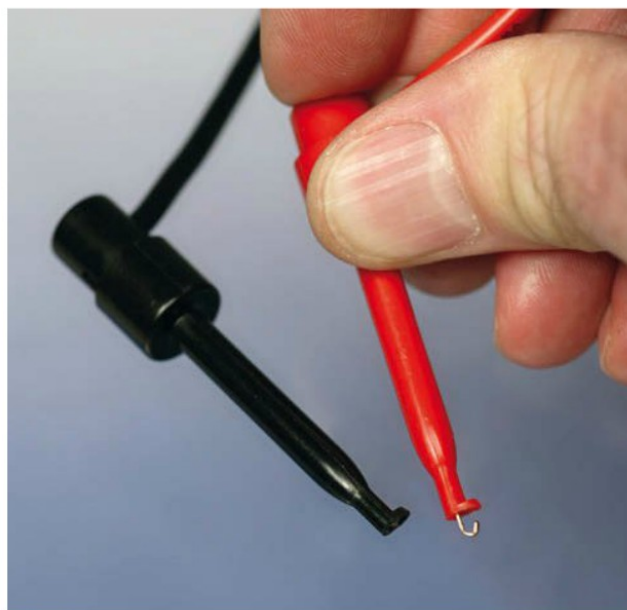


Figure 3-8. Ces petits grip-fils aux extrémités des cordons de mesure servent à agripper les fils ou les broches des composants.



Figure 3-9. Cordons de mesure se terminant par une petite pince crocodile.

Optionnel : pistolet à air chaud

Quand vous soudez deux fils ensemble, vous devez parfois les isoler. Du ruban isolant pour électricien il aura tendance à se décoller rapidement. Il est donc préférable d'utiliser de la gaine thermorétractable, qui permet de réaliser un blindage isolant permanent autour d'une pièce métallique nue. Afin de provoquer la rétraction de la gaine, il faut utiliser un pistolet à air chaud, qui ressemble à un sèche-cheveux (figure 3-10).



Figure 3-10. Un pistolet à air chaud sert à rétracter une gaine thermorétractable, pour former un blindage isolant autour d'une pièce métallique.



Figure 3-11. Un pistolet à air chaud miniature est plus facile à tenir à la main qu'un modèle classique.

Optionnel : matériel de dessoudage

Une *pompe à dessouder* est prévue pour aspirer la soudure en fusion placée à un mauvais emplacement (figure 3-12). Lorsque vous faites une erreur de soudure, elle peut s'avérer utile, mais pour ma part je préfère couper la liaison et la refaire.



Figure 3-12. Pour dessouder une liaison, il est possible d'absorber la soudure en fusion à l'aide de cette poire en caoutchouc.

La *tresse à dessouder* (figure 3-13) est utilisée pour absorber la soudure en fusion par capillarité, en complément de la pompe à dessouder.



Figure 3-13. L'utilisation de cette tresse à dessouder est une autre possibilité pour retirer la soudure en fusion.

Essentiel : support de fer à souder

Quand vous ne l'utilisez pas, vous devez placer votre fer à souder sur un support (figure 3-14). Un support improvisé peut convenir, comme un morceau de tube d'acier ou même une canette métallique clouée sur une planchette de bois. Vous pouvez aussi laisser votre fer à souder sur un coin de votre table de travail, en prenant soin de ne pas le faire tomber. Sinon, il pourrait faire fondre la moquette ou les dalles de plastique.

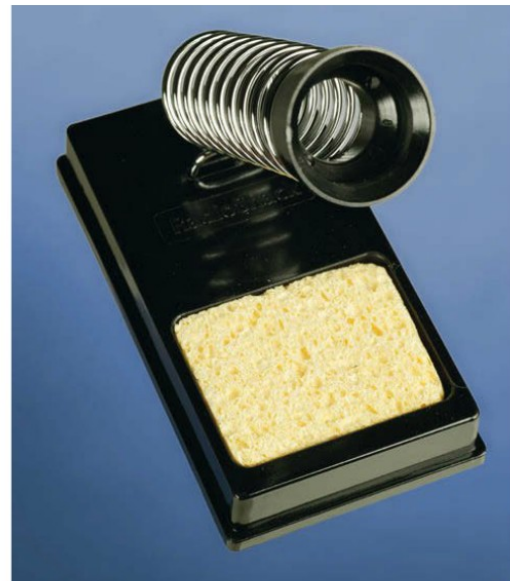


Figure 3-14. Support de fer à souder simple et sûr. L'éponge jaune peut être humidifiée avec un peu d'eau afin de nettoyer la panne du fer à souder.

Optionnel : petite scie à main

Plus ou moins rapidement, vous voudrez placer un de vos projets électroniques dans un petit coffret de belle allure. Pour y parvenir, vous aurez besoin d'un outil pour faire des découpes dans le plastique, par exemple pour percer un trou carré destiné à recevoir un interrupteur d'alimentation.

Les outils électriques sont trop sophistiqués pour ce genre de travail délicat. Une petite scie miniature est idéale pour adapter la fixation des éléments à un coffret (figure 3-15).



Figure 3-15. Scie idéale pour percer des petits trous.

Optionnel : outil à ébavurer

Un outil à ébavurer (figure 3-16) sert à lisser et biseauter instantanément le bord rugueux d'une pièce d'aluminium ou de plastique et même d'élargir légèrement une découpe. Cela s'avère parfois nécessaire car certains composants sont fabriqués selon des dimensions anglosaxonnes et ils pourraient ne pas correspondre aux trous percés à l'aide de forêts métriques.



Figure 3-16. Outil à ébavurer.

Optionnel : pied à coulisse

Cela peut vous paraître luxueux, mais c'est un outil très utile pour mesurer le diamètre externe des objets ronds (comme le filet de vis d'un interrupteur ou d'un potentiomètre) ou le diamètre intérieur d'un trou (dans lequel vous souhaitez insérer un interrupteur ou un potentiomètre). Si vous choisissez un modèle avec affichage digital, alimenté par une pile bouton, il permettra la mesure en millimètres et en pouce par simple commutation.



Figure 3-17. Un pied à coulisse, analogique ou numérique, peut mesurer un diamètre intérieur ou extérieur.

Fournitures

Alors que les outils que je viens de lister sont pour la plupart optionnels, les petites fournitures sont essentielles. Les outils et matériaux qui vous permettront de réaliser de façon définitive vos projets ne sont pas très onéreux.

Essentiel : fil à souder

C'est le matériau que l'on fait fondre pour assurer de façon permanente la liaison électrique entre des composants. Vous devrez disposer de soudure fine de diamètre 0,5 mm à 1 mm, pour assembler les petits composants (figure 3-18). Pour les projets de ce livre, environ 30 g de soudure seront suffisants (fil à souder d'environ un mètre de long).

Évitez d'acheter de la soudure destinée aux plombiers, ou pour les travaux manuels comme la création de bijoux. La description du produit devra mentionner le mot « électronique ».

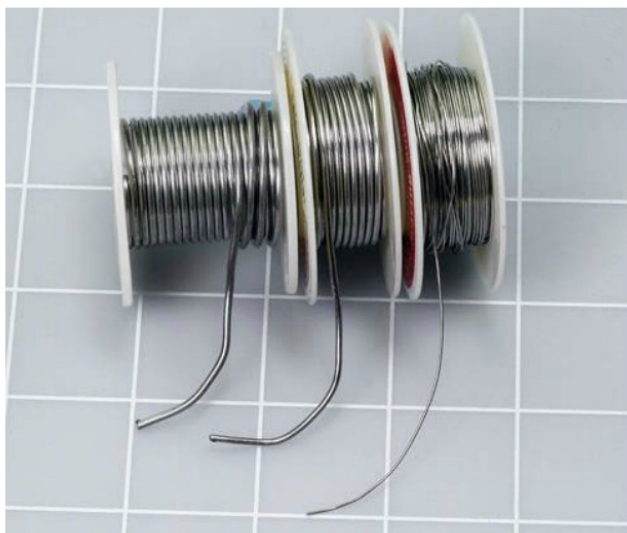


Figure 3-18. Bobines de fil de soudure de différents diamètres.

En Europe, il est interdit d'utiliser de la soudure au plomb pour des raisons environnementales.

Ce dont vous avez absolument besoin, c'est de la soudure en fil avec une âme de flux décapant.

Optionnel : gaine thermorétractable

Ce type de gaine est à utiliser avec le pistolet à air chaud précédemment décrit. Il est prudent de disposer d'une gamme variée de gaines de diamètres et de couleurs différents (figure 3-19). La gaine se glisse sur une liaison soudée, puis vous devez la chauffer à l'aide du pistolet à air chaud. Sous l'effet de la chaleur, la gaine se resserre autour de la soudure et en assure l'isolement. Habituellement, après rétrécissement, le diamètre de la gaine est d'environ la moitié de son diamètre d'origine. Certaines ont toutefois un rapport de rétrécissement supérieur. Les matériaux utilisés offrent différentes caractéristiques d'isolement, de résistance à l'abrasion et autres paramètres. Vous trouverez une grande variété de gaines thermorétractables aux propriétés très variées. Pour notre besoin, la gaine la moins chère conviendra parfaitement, à condition qu'elle soit prévue pour une tension d'isolation de 220 V au minimum. Un assortiment de cinq ou six diamètres différents sera suffisant. Vous utiliserez davantage les petits diamètres que les plus grands.

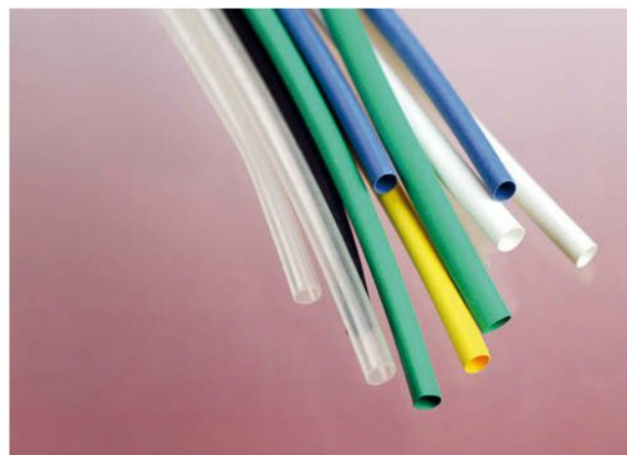


Figure 3-19. Variété de gaines thermorétractables.

Essentiel : pinces crocodiles en cuivre

Elles servent à absorber la chaleur lorsque vous soudez des composants fragiles. Ne vous trompez pas en achetant des pinces crocodiles en acier recouvert de cuivre ; vous devez absolument vous procurer des pinces en cuivre. Deux seront suffisantes, car vous les réutiliserez indéfiniment.



Figure 3-20. Ces petites pinces crocodiles en cuivre absorbent la chaleur afin de protéger les composants fragiles durant les opérations de soudure.

Optionnel : plaques perforées

Lorsque vous souhaitez rendre permanent un circuit préalablement implanté sur une plaque de montage, vous devrez le souder sur une plaque perforée.

Les plaques perforées les plus pratiques à utiliser sont recouvertes de pistes de cuivre au dos, selon la même disposition que les bandes conductrices d'une plaque de montage. Cela minimise les erreurs en conservant

la même disposition de vos composants quand vous passez à une plaque perforée (figure 3-21). Pour débiter, n'achetez qu'une plaque.

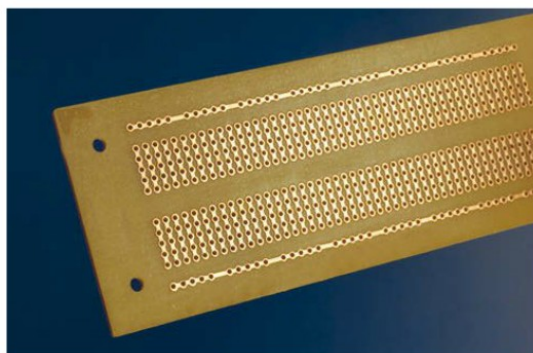


Figure 3-21. Cette plaque perforée possède des bandes de cuivre ayant la même disposition que les bandes conductrices internes d'une plaque de montage.

La réalisation d'un circuit sur une plaque de montage n'optimise pas la surface utilisée. C'est un inconvénient, si vous utilisez la même disposition des composants sur une plaque perforée. Pour réduire un circuit à sa taille minimale, vous pouvez essayer le câblage point-à-point sur une plaque perforée non cuivrée – je vous montrerai comment faire lors de l'expérience 14. Vous n'avez besoin que d'une petite plaque perforée vierge ; vous pouvez cependant en acheter une plus grande et la découper selon vos besoins (figure 3-22).

Vous pouvez également utiliser une plaque perforée avec des pistes de cuivre disposées selon une autre configuration. Certaines plaques ont, par exemple, des pistes parallèles que vous pouvez découper à l'aide d'un cutter, lorsque vous souhaitez interrompre une connexion. Toute personne qui soude ses circuits préfère un type particulier de plaque ; vous devez vous accoutumer aux travaux de soudure avant de faire vos choix.

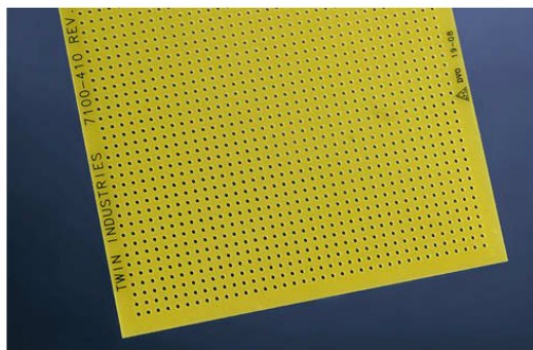


Figure 3-22. Plaque perforée vierge (sans pistes de cuivre), permettant un câblage point-à-point.

Optionnel : contreplaqué

Lorsque vous vous servez d'un fer à souder, des gouttes de soudure chaude peuvent tomber sur votre table de travail. La soudure se solidifie presque instantanément et peut être difficile à retirer. Une planche de contreplaqué carrée d'environ 60 cm de côté protégera votre table de travail.

Optionnel : boulons

Pour monter des composants au dos de la façade d'un coffret, vous devrez utiliser de petits *boulons à tête fraisée*. Ils ont un aspect agréable, leur tête plate affleure la surface si vous avez fraisé les trous. Je vous suggère des boulons de diamètre 3 mm et de longueur 12 mm et 25 mm, munis d'écrous-freins de type Nylstop, qui ont une collerette en nylon empêchant l'écrou de se desserrer.

Essentiel : petits coffrets

Un coffret pour projet est une petite boîte (généralement en plastique) possédant un couvercle amovible, destinée à recevoir un montage électronique. Le couvercle reçoit les interrupteurs, les potentiomètres et les LED dans des trous que vous devrez percer. Le circuit réalisé sur une plaque perforée se logera à l'intérieur du coffret. Vous pouvez également utiliser une de ces petites boîtes pour y loger un haut-parleur.

Pour le projet d'alarme d'intrusion de l'expérience 15, vous devrez utiliser un coffret d'environ 15 × 8 cm et 5 cm d'épaisseur.

Essentiel : connecteurs d'alimentation

Lorsque vous aurez terminé un projet et le mettrez dans un coffret, vous aurez besoin de l'alimenter de façon pratique. Vous pouvez acheter un ensemble de connecteurs d'alimentation (figure 3-23). Ils sont souvent appelés *jack* ou *adaptateurs jack d'alimentation*. Ils existent en différents diamètres, mais c'est sans importance, tant qu'ils ont tous deux le même diamètre.



Figure 3-23. L'embase à droite peut être installée dans un coffret. Elle reçoit le connecteur mâle de gauche, qui sera relié à l'adaptateur d'alimentation.

Optionnel : barrettes de connexion

Après avoir soudé votre circuit sur une plaque perforée, vous devrez le relier à différents éléments externes tels que des interrupteurs ou des boutons-poussoir. Une liaison permanente est préférable pour chercher un défaut.

Les barrettes de connexion mâles ou femelles (encore appelées « tulipe »), se présentent sous forme d'une rangée de broches, en général 36, voire davantage, que vous pouvez découper selon le nombre de liaisons nécessaires et insérer ou extraire à volonté.

La figure 3-24 montre ces barrettes avant qu'elles n'aient été coupées en petites sections. Assurez-vous que l'espacement entre leurs broches est bien de 2,54 mm, afin de correspondre aux trous de votre plaque perforée.

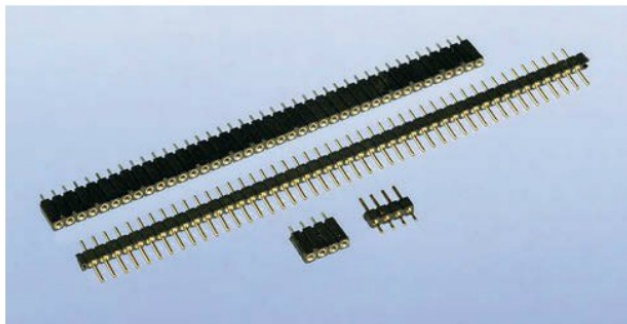


Figure 3-24. Barrettes de connexion miniatures.

Composants

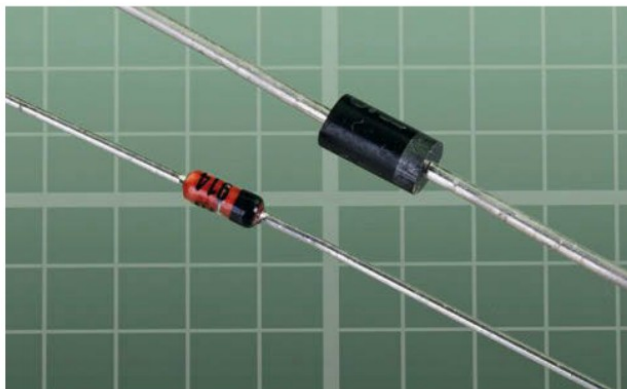


Figure 3-25. Deux diodes. Leur côté le plus négatif (cathode) est repéré.

Expérience 12 : une jonction de deux fils

Maintenant, vous voici prêt à utiliser tout ce que je viens de décrire. En premier lieu, nous commencerons par le fer à souder.

Votre aventure commence par la tâche délicate qui consiste à relier entre eux deux morceaux de fil, mais nous en viendrons rapidement à la réalisation complète d'un circuit sur une plaque perforée.

De quoi avez-vous besoin ?

- Du fil de câblage, 1 pince coupante, 1 pince à dénuder
- 1 fer à souder de 30 W ou 40 W
- 1 fer à souder de 15 W
- De la soudure fine
- De la soudure de diamètre moyen (en option)
- 1 « troisième main » pour maintenir votre travail
- Assortiment de gaines thermorétractables (en option)
- 1 pistolet à air chaud (en option)
- 1 morceau de carton épais ou de contreplaqué pour protéger votre zone de travail des projections de soudure (en option)

Attention : les fers à souder deviennent très chauds

Il est important de prendre les précautions suivantes :

- Utilisez un support adéquat, comme celui incorporé dans la « troisième main », afin de poser votre fer à souder. Ne laissez jamais votre fer à même votre table de travail.
- Si vous avez des enfants ou un animal domestique, rappelez-vous qu'ils pourraient vouloir jouer avec, ou attraper le fer ou son cordon secteur. Ils pourraient alors se blesser, ou vous blesser.
- Faites attention à ne jamais mettre en contact la panne de votre fer avec son cordon d'alimentation. Cela pourrait faire fondre le plastique de son câble d'alimentation en quelques secondes et provoquer un violent court-circuit.

- Si le fer à souder vous échappe des mains, ne jouez pas les héros en tentant de le rattraper.
- Les fers à souder n'ont généralement pas de voyant de mise sous tension pour vous indiquer qu'ils sont branchés. En règle générale, considérez toujours que votre fer est chaud, même s'il est débranché. La chaleur accumulée peut aussi vous brûler.

Votre première soudure

Nous allons commencer par utiliser le fer à souder de 30 W ou 40 W. Branchez-le et placez-le dans son support, par précaution, pendant environ cinq minutes. Si vous utilisez votre fer à souder avant qu'il soit suffisamment chaud, la soudure ne fondra pas assez.

Dénudez une extrémité de chacun des deux morceaux de fil rigide de jauge AWG 22 et maintenez-les à l'aide de votre troisième main afin qu'ils se croisent en se touchant (figure 3-26).

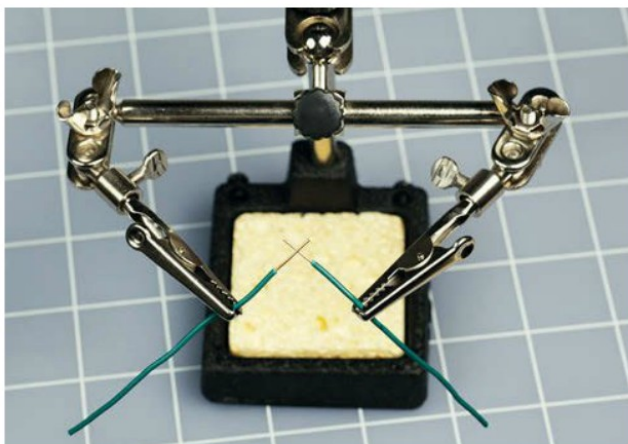


Figure 3-26. Prêt pour votre première soudure.

Pour être sûr que votre fer soit prêt, approchez de sa panne un mince fil de soudure : il devrait fondre instantanément. Si la fusion est lente, le fer à souder n'est pas encore prêt.

L'extrémité de la panne doit être propre, sinon vous devez la nettoyer. Il est d'usage de le faire avec la petite éponge incorporée au support du fer, que vous aurez humidifiée avec de l'eau. Personnellement, je le déconseille car, en humidifiant la panne du fer, une rétraction thermique suivie d'une expansion se produisent et peuvent occasionner des fissures dans la couche métallique de la panne. Je préfère frotter l'extrémité de la panne avec une boule de papier froissé, assez rapidement pour éviter au papier de brûler. Ensuite, j'applique un peu de soudure et je nettoie à nouveau la panne, jusqu'à ce qu'elle soit brillante.

Quand l'extrémité du fer est nettoyée, suivez les étapes décrites ci-après (figures 3-27 à 3-31).

- **Étape 1.** Appliquez l'extrémité de la panne du fer à l'intersection des fils pendant environ trois secondes, afin de les chauffer.

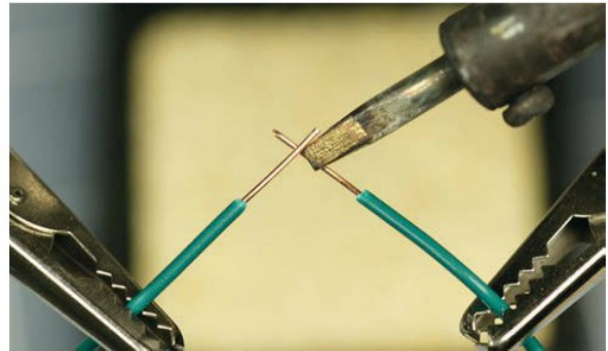


Figure 3-27.

- **Étape 2.** Tout en maintenant le fer dans cette position, déposez un peu de soudure à l'intersection des fils, tout en touchant simultanément l'extrémité du fer. Ainsi, les deux fils, la soudure et la panne du fer sont réunis en un seul point.

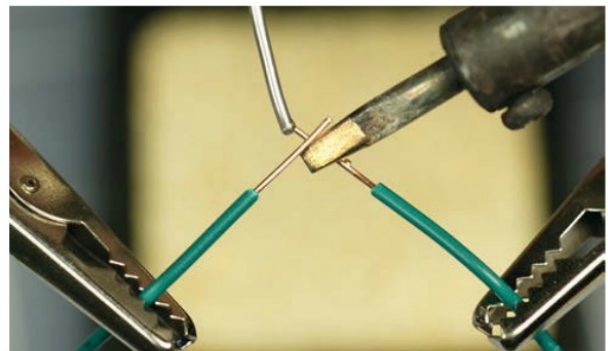


Figure 3-28.

- **Étape 3.** Au début, la soudure peut fondre lentement : il faut être patient.

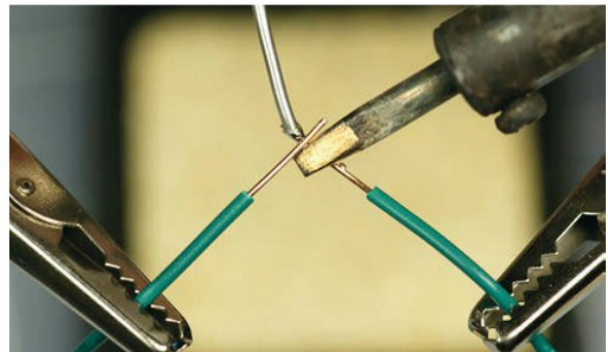


Figure 3-29.

- **Étape 4.** La soudure doit maintenant former une petite boule.

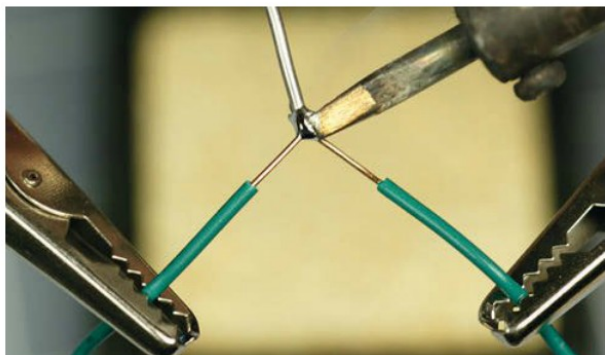


Figure 3-30.

- **Étape 5.** Éloignez le fer et la soudure des fils. Soufflez sur le point de soudure, pour le refroidir. En dix secondes, il devrait être suffisamment froid pour que vous puissiez le toucher. La soudure terminée doit être uniformément brillante et en forme de gouttelette.

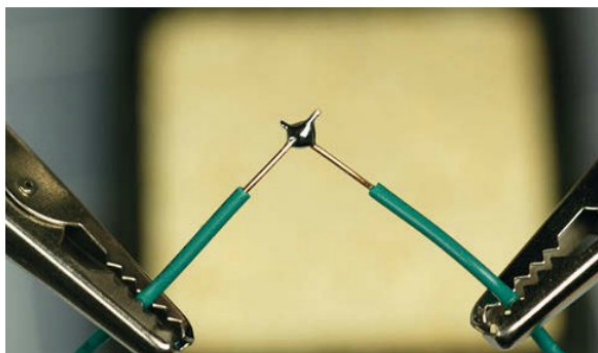


Figure 3-31.

Une fois que la soudure est refroidie, libérez les fils de la troisième main et essayez de les séparer (figure 3-32). Tirez fort ! S'ils résistent à votre tentative pour les séparer, les fils sont électriquement reliés et devraient le rester. Si votre soudure n'est pas bien faite, les deux fils peuvent être séparés assez facilement, probablement parce que vous n'avez pas assez chauffé les fils ou mis trop peu de soudure.

Je vous conseille de commencer par le fer à usage général parce qu'il produit plus de chaleur, ce qui rend son usage plus facile.

Les étapes de soudure peuvent se résumer ainsi :

- chauffer les fils,
- appliquer la soudure sur les fils, tout en maintenant le fer à souder en place,

- attendre que la soudure commence à fondre et qu'elle forme une perle liquide,
- retirer le fer à souder.

Chacune de ces étapes devrait durer de quatre à six secondes.

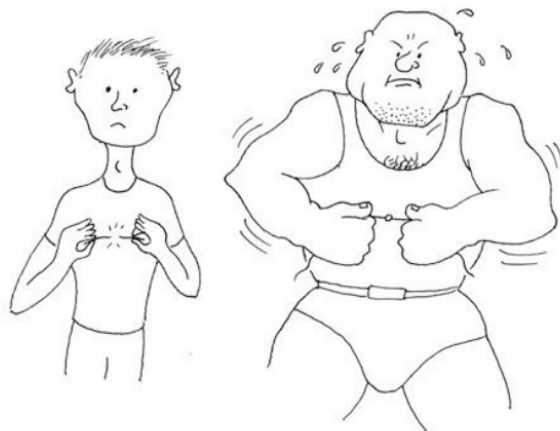


Figure 3-32. Il n'est pas difficile de voir la différence entre une mauvaise soudure (à gauche) et une bonne (à droite).

Les idées reçues sur la soudure

1. **La soudure est une opération difficile.** Des millions de personnes ont appris comment procéder ; ils ne sont cependant pas plus experts que vous. Souffrant depuis longtemps d'un problème de tremblement des mains, j'ai des difficultés à tenir de petites pièces fermement. J'ai aussi le défaut d'être impatient pour les travaux minutieux. Alors, si j'arrive à souder des composants, vous aussi !
2. **La soudure met en danger votre santé à cause de produits chimiques nocifs.** Vous devriez éviter d'inhaler les fumées, mais cela est vrai pour tous les produits du quotidien, eau de javel ou peintures. Vous devriez vous laver les mains après avoir manipulé de la soudure et, pour parfaire le nettoyage, utiliser une brosse à ongles. Toutefois, si réaliser des soudures était réellement dangereux, on aurait dû constater de nombreux décès chez les amateurs d'électronique depuis des décennies.
3. **Les fers à souder sont dangereux.** Un fer à souder est moins dangereux que le fer utilisé pour le repassage de vos chemises, car il délivre beaucoup moins de chaleur. En fait, selon ma propre expérience, souder est bien moins dangereux que la plupart des travaux ménagers

ou de bricolage. Cela ne signifie pas que vous ne deviez pas être prudent. Un fer à souder est assez chaud pour vous brûler la peau si vous le touchez.

Fondamentaux : erreurs à ne pas commettre

Chaleur insuffisante. La soudure paraît bonne, mais comme vous n'avez pas assez chauffé les pièces, elle n'a pas assez fondu pour modifier sa structure moléculaire et elle est restée granulaire, au lieu de devenir une boule solide, uniforme. Une telle soudure est une *soudure sèche*, également appelée *soudure froide*, qui cède lorsqu'on tire sur les fils pour les séparer. Réchauffez à nouveau le point de soudure avec soin et ajoutez un peu de fil de soudure.

Fils froids. Une des causes principales de soudures trop peu chauffées tient à la tentation de faire fondre le fil sur le fer, puis de laisser la goutte se déposer sur les pièces à assembler. Dans ce cas, les fils sont froids quand vous essayez de faire adhérer la soudure. Vous devez d'abord appliquer le fer à souder sur les fils, puis appliquer la soudure.

Chaleur excessive. Cela ne devrait pas abîmer la soudure. En revanche, vous pourriez endommager ce qui se trouve autour. Les pièces isolantes en plastique pourraient fondre, laissant les fils à nu et augmentant les risques de court-circuit. Vous pourriez facilement endommager les semi-conducteurs, ou même les pièces internes en plastique des interrupteurs et des connecteurs. Remplacer des composants détruits est difficile et cela prend du temps.

Pas assez de soudure. Une fine connexion entre deux pièces conductrices est parfois trop fragile. Lorsque vous soudez deux fils, vérifiez que le dessous du point de soudure est bien recouvert.

Déplacer le point de soudure avant que la soudure ne soit solidifiée. Cela peut créer une fissure que vous ne verrez probablement pas. Votre circuit pourrait continuer à fonctionner, mais, tôt ou tard, en raison des vibrations ou de contraintes thermiques, la fissure pourrait céder et séparer les deux pièces suffisamment pour rompre leur contact électrique. Rechercher ce type de problème sera fastidieux. Si vous maintenez les composants avant de procéder à leur soudure, ou si vous utilisez une plaque perforée pour les tenir en place, vous éviterez ce problème.

Saleté ou graisse. La soudure pour l'électronique contient du flux décapant qui nettoie le métal que vous devez souder. Cependant, certains contaminants peuvent

empêcher la soudure d'adhérer. Si un composant paraît sale, nettoyez-le avec un peu de papier de verre très fin avant de le souder.

Carbonisation de l'extrémité de la panne du fer à souder. Durant son utilisation, le fer à souder se couvre peu à peu de taches de carbonisation qui peuvent s'opposer au transfert de la chaleur. Nettoyez la panne comme je l'ai indiqué précédemment.

Matériaux inappropriés. La soudure électrique est prévue pour les composants électroniques. Elle ne convient pas à la soudure de l'aluminium, de l'acier inoxydable ainsi qu'à certains autres matériaux. Vous parviendrez à la faire adhérer aux pièces chromées, mais avec beaucoup de difficultés.

Oubli de vérification du point de soudure. Vérifiez toujours la solidité de votre soudure en essayant de la faire céder par force. Si vous ne pouvez pas agripper la pièce, passez un petit tournevis en dessous et tirez-la, ou utilisez une pince plate pour essayer de la séparer. N'ayez pas peur de détruire ainsi votre travail. Si votre soudure ne résiste pas à un tel traitement, ce n'est pas une bonne soudure.

De toutes ces erreurs, la soudure sèche est la plus redoutable, car elle est facile à créer et donne l'illusion d'être parfaite.

Historique : les alternatives au soudage

Dans les années 1950, les liaisons internes des appareils électroniques tels que les récepteurs radio, se faisaient par des soudures manuelles effectuées par des ouvriers sur des lignes de production. Mais le développement croissant des échanges téléphoniques a nécessité la recherche d'une solution à la création de connexions fiables et rapides. La technique d'enroulement, ou *wrapping* en anglais, devient alors une alternative à la soudure classique.

Dans un circuit réalisé en wrapping, les composants sont montés sur des plaques possédant des broches dorées carrées et longues, dépassant à l'arrière. Un fil spécifique, plaqué argent, est utilisé après avoir été dénudé sur environ 2,5 cm. Un outil à main ou électrique enroule le fil autour d'une de ces broches, assurant une tension suffisante pour *souder à froid* le fil argenté et la broche. Le wrapping crée une tension mécanique suffisante pour permettre des liaisons très fiables, grâce à 7 ou 8 enroulements des spires, chacune touchant les quatre côtés de la broche.

Dans les années 1970 et 1980, ce système a été adopté par les amateurs qui construisaient leur propre ordinateur. Le circuit d'un ordinateur fabriqué manuellement est représenté sur la figure 3-33. Cette technique a été utilisée par la NASA pour câbler l'ordinateur des capsules Apollo qui se sont posées sur la lune. Aujourd'hui, les connexions enroulées n'ont plus beaucoup d'applications commerciales.

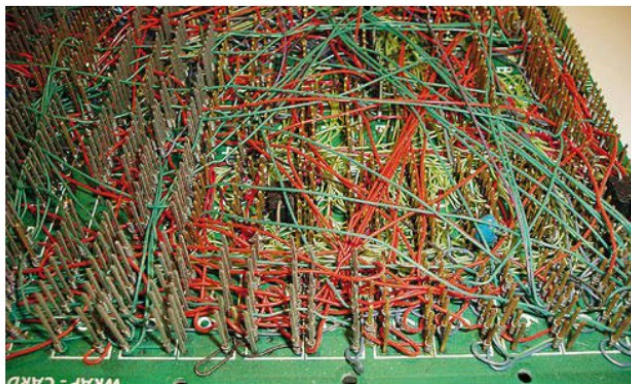


Figure 3-33. Cette photo montre quelques liaisons en wrapping de l'ordinateur 8 bits réalisé par Steve Chamberlin. Réaliser un tel réseau de connexions à l'aide de soudures manuelles aurait pris un temps énorme et conduit à de nombreuses erreurs.
Crédit photo : Steve Chamberlin

L'utilisation industrielle très répandue des composants « traversants » tels que les circuits intégrés utilisés dans les premiers ordinateurs, a encouragé le développement de la technologie de la *soudure à la vague*. Dans ce procédé, une vague ou une chute de soudure en fusion est appliquée mécaniquement sur la face inférieure d'une plaque de circuit imprimé préchauffée, dans laquelle les composants ont été insérés. Une technique de masquage empêche la soudure de se déposer aux endroits où elle ne doit pas apparaître.

De nos jours, les composants montés en surface (bien plus petits que leurs homologues à broches traversantes) sont d'abord collés au circuit imprimé à l'aide de pâte à souder. L'ensemble est alors chauffé afin de faire fondre la pâte et créer des connexions permanentes.

Votre deuxième soudure

Vous allez maintenant vous servir de votre fer à souder de 15 W. Vous devez à nouveau le laisser branché pendant cinq bonnes minutes afin qu'il soit suffisamment chaud. Pendant ce temps, n'oubliez pas de débrancher le premier fer et rangez-le dans un endroit sûr pendant qu'il refroidit.

Utilisez de la soudure fine ; elle absorbera moins de chaleur de votre fer à souder moins puissant.

Cette fois, nous allons aligner les fils. Il est un peu plus difficile de les souder de cette façon que lorsqu'ils se croisent, mais vous devez acquérir cette pratique. Dans le cas contraire, vous ne pourriez pas insérer une gaine rétractable sur la soudure pour l'isoler.

Les figures 3-34 à 3-38 illustrent la réalisation de ce type de soudure. Au début, les fils ne doivent pas être parfaitement collés ; la soudure comblera tout espace. Comme précédemment, les fils devront être suffisamment chauds pour que la soudure coule correctement ; cela pourra prendre quelques secondes de plus car vous utilisez un fer de faible puissance.

Veillez à bien déposer la soudure comme sur les figures. N'oubliez pas : il ne faut pas essayer de faire fondre la soudure sur le fer. Chauffez les fils, puis mettez la soudure en contact. Attendez jusqu'à ce que la soudure se liquéfie et vous la verrez se déposer tout le long du point d'assemblage. Si ce n'est pas le cas, soyez plus patient et chauffez les fils plus longtemps.

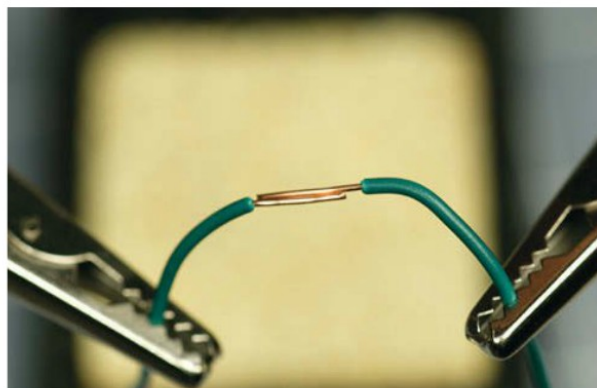


Figure 3-34. Étape 1 : alignez les fils.

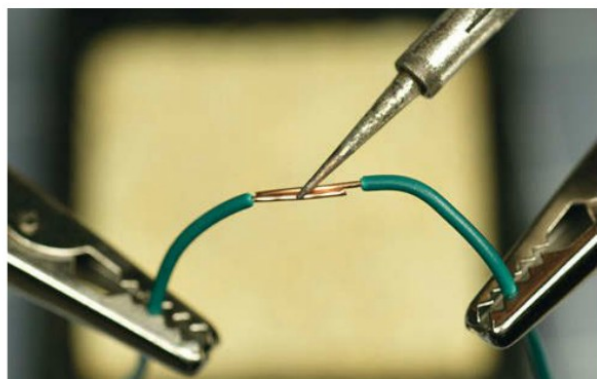


Figure 3-35. Étape 2 : chauffez les fils.

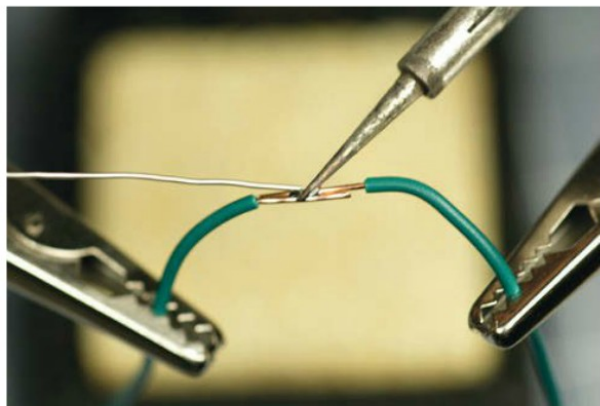


Figure 3-36. Étape 3 : tout en continuant à chauffer les fils, déposez la soudure. Attendez qu'elle commence à fondre. Soyez patient.

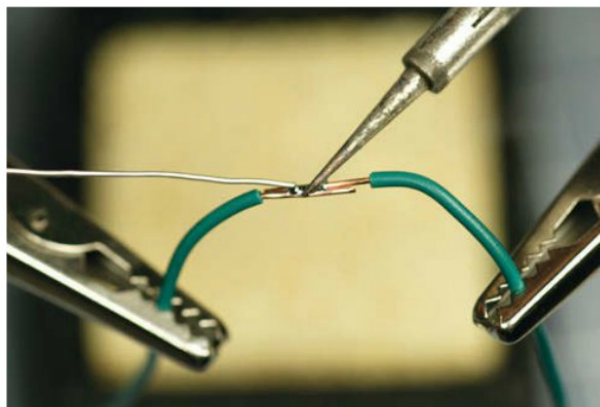


Figure 3-37. La soudure fond au point d'assemblage.

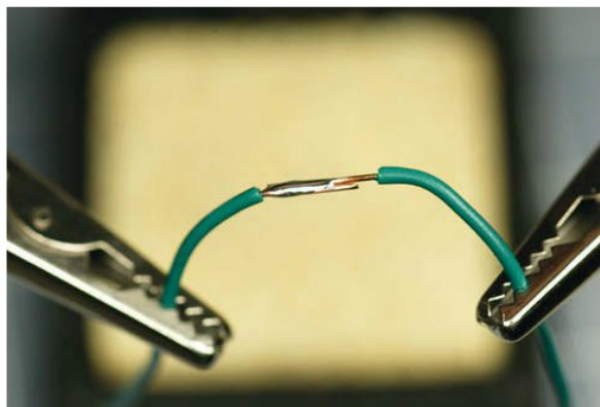


Figure 3-38. La soudure brille et s'est écoulée le long des fils de cuivre.

La soudure terminée utilise assez de fil de soudure pour être mécaniquement résistante, mais suffisamment peu pour permettre à une gaine thermorétractable de glisser dessus. J'y viens dans un moment.

Théorie : transfert de la chaleur

Mieux vous comprendrez le processus, plus il vous sera facile de réaliser de bonnes soudures.

L'extrémité de votre fer est chaude et vous devez transférer sa chaleur aux pièces que vous voulez souder. Pour cette raison, vous devez ajuster l'inclinaison de votre fer afin qu'il soit le plus possible en contact avec les pièces à assembler (figures 3-39 et 3-40).

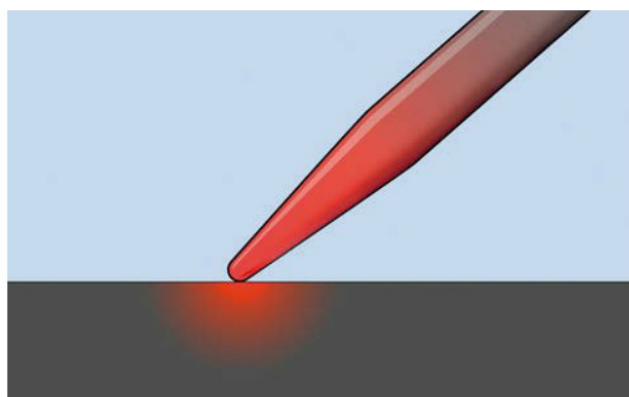


Figure 3-39. Une surface de contact trop réduite avec la pièce ne permet pas un transfert de chaleur suffisant.

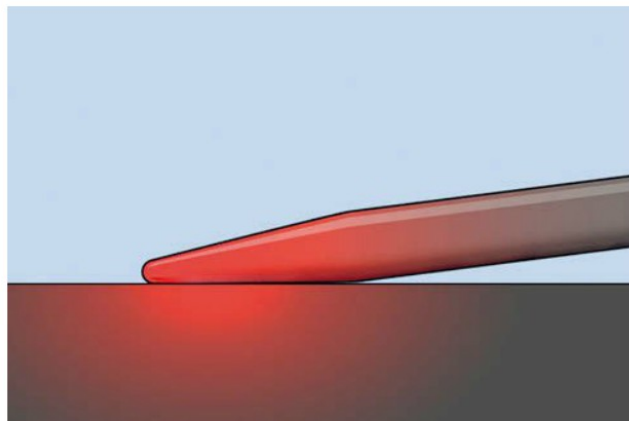


Figure 3-40. Une plus grande surface de contact favorise le transfert de chaleur.

Lorsque la soudure commence à fondre, elle augmente la surface de contact, ce qui facilite le transfert de plus de chaleur. Ainsi, le processus s'accélère naturellement. Le plus difficile c'est le début.

Un autre aspect à ne pas négliger : le transfert de chaleur peut se faire à un endroit non souhaité. Si vous essayez de souder un morceau de fil de cuivre de gros diamètre, le point de soudure risque de ne jamais atteindre une température suffisante pour faire fondre le fil de soudure car le cuivre évacuera la chaleur. Même un fer de 40 W ne sera pas assez puissant pour surmonter ce problème. Si le cuivre n'est pas assez chauffé pour faire fondre la soudure, il peut quand même être assez chaud pour faire disparaître la gaine isolante du fil.

En règle générale, une soudure ne devrait pas vous prendre plus de 10 secondes, au-delà c'est que le transfert de chaleur n'est pas suffisant.

Isolation du point de soudure

Après avoir réussi une connexion rectiligne entre deux fils, tout devient plus simple. Choisissez une gaine thermorétractable assez grosse pour qu'elle glisse sur le point de soudure sans forcer.

Vous devez bien entendu avoir prévu cette opération. Normalement, vous devriez glisser un peu de gaine sur un des fils *avant* de réaliser la soudure.

Faites glisser la gaine thermorétractable jusqu'à ce qu'elle soit centrée sur un des fils, jusqu'au point de jonction. Maintenez-la face à la buse de votre pistolet à air chaud et mettez-le en marche (en protégeant vos doigts du courant d'air qui est extrêmement chaud). Faites tourner le fil afin de le chauffer de tous côtés pendant environ 30 secondes. Si vous surchauffez la gaine, elle risque de rétrécir et de se fendre, vous devriez alors la retirer et recommencer. Aussitôt que la gaine est resserrée, vous avez terminé, il est inutile de continuer à la chauffer. Notez que la gaine se resserre principalement selon son diamètre mais elle raccourcit également, très légèrement.

Les figures 3-41 à 3-43 montrent le résultat. J'ai utilisé de la gaine blanche pour bien la distinguer sur les photos.

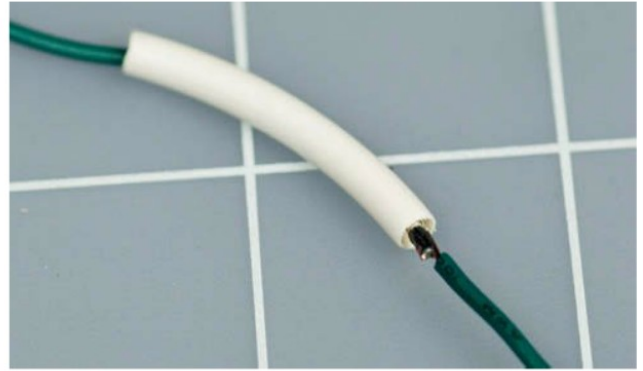


Figure 3-41. Faites glisser la gaine sur la jonction soudée.

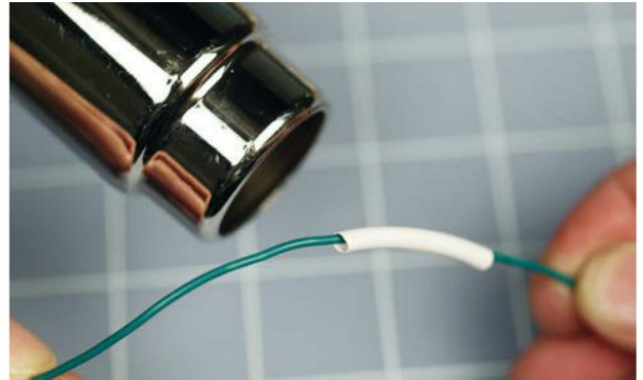


Figure 3-42. Chauffez la gaine.

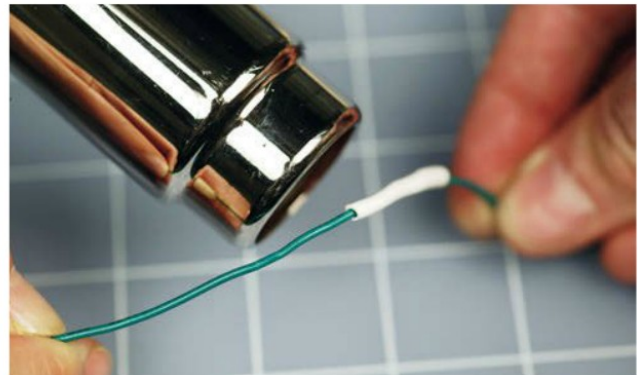


Figure 3-43. Chauffez la gaine jusqu'à ce qu'elle rétrécisse et recouvre fermement la soudure.

Attention : les pistolets à air chaud deviennent très chauds !

Remarquez la buse en acier chromé située à l'extrémité du pistolet. Le fabricant avait une bonne raison d'en utiliser de l'acier plutôt que du plastique : l'air chaud qui passe au travers est si chaud qu'il ferait fondre un tube en plastique.

Le tube métallique reste suffisamment chaud pendant plusieurs minutes après l'arrêt du pistolet et vous risquez de vous brûler. Comme pour les fers à souder, vos proches sont vulnérables car ils ne savent pas nécessairement que le pistolet thermique est brûlant. Surtout, veillez à ce que personne ne le confonde avec un sèche-cheveux (figure 3-44).



Figure 3-44. Votre entourage doit comprendre qu'un pistolet à air chaud n'est pas un sèche-cheveux.

Cet outil est plus dangereux qu'il n'y paraît. Un pistolet à air chaud miniature présente moins de risques, mais doit cependant être manipulé avec précaution.

Câblage de votre source d'alimentation

La prochaine mise en œuvre de vos connaissances en soudure va vous être utile. Vous pourrez ajouter des fils monobrins à votre adaptateur secteur ou, si vous n'en utilisez pas, allonger les fils du connecteur de votre pile de 9 V. Quoi qu'il en soit, les fils de jauge AWG 22 ainsi allongés s'inséreront facilement dans votre plaque de montage.

Vous pouvez utiliser votre fer le plus puissant pour ce travail, car aucun composant sensible à la chaleur n'est présent.

Si vous avez acheté un adaptateur d'alimentation secteur, je suppose qu'il s'agit d'un petit module en plastique qui se branche dans une prise de courant murale. Deux fils, véhiculant le courant continu de faible tension, en sortent et se terminent par un petit connecteur. Ce connecteur convient pour un appareil tel qu'un lecteur MP3 ou un téléphone possédant un connecteur correspondant, mais, pour les projets de ce livre, ce connecteur est sans intérêt car vous devez appliquer la tension d'alimentation directement sur une plaque de montage.

Voyons comment procéder.

Première étape : mesurez et coupez

Assurez-vous tout d'abord que votre adaptateur est bien prévu pour l'usage que souhaitez en faire.

Ne le branchez pas encore. Commencez par couper le petit connecteur à l'extrémité du câble fournissant la tension continue (figure 3-45).



Figure 3-45. Personnalisation de votre adaptateur secteur : étape 1.

Séparez les deux conducteurs à l'aide de votre pince coupante ou d'un cutter, puis dénudez-les sur environ 6 mm (figure 3-46). Les fils doivent être de longueurs différentes afin d'éviter qu'ils se touchent. Si les extrémités dénudées se touchaient, alors que l'adaptateur est relié au secteur, il

pourrait subir une surcharge ou griller un fusible interne. Vous pourriez également générer une étincelle. Ce n'est pas grave, mais c'est désagréable.



Figure 3-46. Les fils dénudés.

Réglez votre multimètre pour mesurer une tension continue et reliez-le aux deux fils de l'adaptateur, de préférence en utilisant des fils de test avec des pinces crocodiles, afin de garder le contrôle de l'ensemble. Après avoir vérifié à nouveau que le fil de mesure rouge de votre multimètre est bien enfiché dans le connecteur **volts** et non pas **mA**, branchez l'adaptateur dans la prise murale et observez la valeur de la tension délivrée.

Si vous obtenez une mesure étonnamment élevée, c'est peut-être parce que la tension délivrée par un adaptateur secteur est souvent plus élevée quand il n'alimente aucun circuit. La résistance interne de votre multimètre est si grande, que l'adaptateur croit qu'il n'est pas du tout chargé.

Pour un test significatif, choisissez une résistance de $680\ \Omega$ et reliez-la à la sortie de votre adaptateur, en parallèle avec votre multimètre. Cela devrait faire décroître la tension délivrée à un niveau plus adéquat. Vous devriez maintenant obtenir une valeur normale.

L'utilisation d'une résistance de valeur inférieure à $680\ \Omega$ n'est pas recommandée, car les résistances que vous avez achetées sont prévues pour une puissance dissipée maximale de $\frac{1}{4}\text{ W}$. Si vous tentez de leur appliquer une puissance supérieure, elles pourraient surchauffer. Si une résistance de $680\ \Omega$ est reliée à une source d'alimentation de 9 V, la loi d'Ohm nous indique que l'intensité qui la traverse est d'environ 13 mA ; cela induit une puissance dissipée d'environ 0,12 W, ce qui est inférieur à la puissance maximale autorisée pour la résistance.

Étape 2 : la soudure

Utilisez votre multimètre pour vous assurer que la tension mesurée sur les fils de sortie de votre adaptateur n'est pas négative. Dans le cas contraire, il faudrait inverser les fils de votre multimètre.

Si votre multimètre indique une valeur positive, vous savez que son fil rouge est relié au pôle positif de la sortie de votre adaptateur. C'est important, car votre adaptateur ne doit pas détruire les composants de vos circuits en appliquant une tension d'alimentation inversée.

Les étapes suivantes seront identiques, que vous ajoutiez les fils de jauge AWG 22 à un adaptateur secteur ou au connecteur d'une pile.

Coupez deux longueurs de fil de jauge AWG 22, l'une étant rouge, l'autre noire. Chaque fil doit être long d'environ 5 cm. Dénudez chacune de leurs extrémités sur 6 mm.

Soudez-les aux fils sortant de l'adaptateur ou du connecteur de pile, en suivant la technique que vous venez d'apprendre. Vous devez, bien entendu, relier le fil rouge au pôle positif de votre source de tension.

Si vous possédez un pistolet à air chaud et de la gaine thermorétractable, utilisez-les comme précédemment. Votre travail terminé devrait ressembler à celui de la figure 3-47.



Figure 3-47. Les fils de jauge AWG 22 peuvent être insérés dans une plaque de montage, pour l'alimenter.

Raccourcir un câble d'alimentation

Maintenant que vous savez souder, vous pouvez essayer de réduire la longueur d'un câble d'alimentation. Un ordinateur portable est en général équipé d'un cordon

d'alimentation détachable, en plus du cordon de sortie de la tension continue. Un tel câble avec fiche secteur est représenté sur la figure 3-48.



Figure 3-48. Cordon d'alimentation secteur détachable d'un bloc d'alimentation d'ordinateur portable.

Les figures 3-48 à 3-51 et 3-61 montrent un câble d'alimentation avec fiche secteur USA, mais l'utilisation d'un câble aux normes françaises ne modifie en rien les opérations suivantes.

Le câble de votre imprimante ou de votre scanner peut également convenir. Cet exercice vous sera utile pour ne plus avoir des câbles qui s'emmêlent au sol mais aussi pour alléger vos bagages.

Douze étapes pour raccourcir un cordon

Il faut tout d'abord raccourcir le cordon, sans hésitation, avec une pince coupante (figure 3-49). Inutile de vous rappeler que toutes ces étapes doivent être exécutées lorsque le cordon n'est pas relié à une prise de courant alternatif.



Figure 3-49. Étape 1.

La figure 3-50 montre les deux parties que vous allez conserver. Vous pouvez garder le surplus du câble pour un usage futur.



Figure 3-50. Étape 2.

Utilisez un cutter pour séparer les deux conducteurs de chaque portion du câble d'alimentation (figure 3-51).



Figure 3-51. Étape 3.

Coupez les conducteurs de façon à ce qu'ils correspondent, mais en ayant une longueur différente (figure 3-52). De cette façon, leur soudure paraîtra moins épaisse et cela limitera les risques de court-circuit si l'une des soudures venait à se rompre.

Vous pouvez remarquer que l'un des conducteurs est identifié, soit par un marquage, soit par un rainurage de sa gaine. Assurez-vous que les deux extrémités du conducteur ainsi identifié correspondent bien entre elles.



Figure 3-52. Étape 4.

Dénudez les conducteurs sur une longueur d'environ 3 mm. Si vous en disposez, découpez ensuite trois morceaux de gaine thermorétractable. Deux des morceaux doivent être assez longs pour pouvoir glisser sur les conducteurs ; le troisième, d'environ 5 cm recouvrira l'ensemble soudé (figure 3-53).

Certaines gaines thermorétractables sont prévues pour isoler uniquement des conducteurs à basse tension. Il ne faut pas les utiliser pour cet usage.



Figure 3-53. Étape 5.

Passons maintenant au plus difficile : utiliser votre mémoire. Vous devez faire glisser les morceaux de gaine sur les fils et le câble, *avant* de procéder à la soudure des conducteurs (figure 3-54). En effet, les connecteurs aux extrémités des deux câbles vous empêcheraient de glisser les morceaux de gaine.



Figure 3-54. Étape 6.

Utilisez votre troisième main pour aligner les conducteurs à souder en premier (figure 3-55). Pousser les deux extrémités l'une vers l'autre, afin qu'elles s'entremêlent, puis torsadez-les avec vos doigts pour éviter que des brins de cuivre ne dépassent. Il arrive qu'un petit brin de cuivre perfore la gaine thermorétractable lorsqu'elle rétrécit sous l'effet de la chaleur.

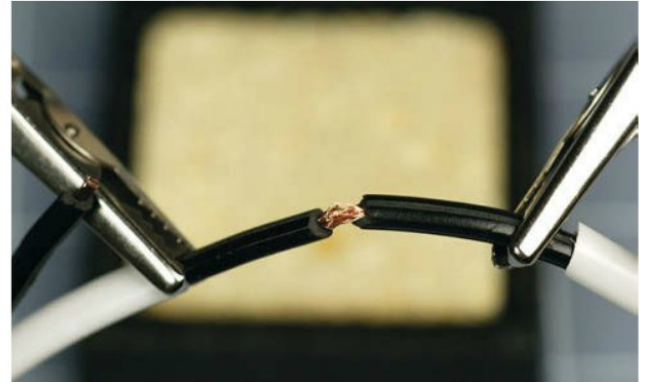


Figure 3-55. Étape 7.

Les fils que vous allez souder sont beaucoup plus gros que les fils de jauge AWG 22 utilisés jusqu'à présent, aussi ils vont absorber une quantité de chaleur plus importante. Vous devrez donc appliquer la pointe de votre fer à souder plus longtemps. Prenez garde à ce que la soudure pénètre bien tout autour du point de jonction ; vérifiez aussi en dessous après refroidissement. Le point de soudure doit former une petite boule uniforme et brillante (figure 3-56).

Pendant l'utilisation du fer, éloignez suffisamment les morceaux de gaine des points de soudure, afin que la chaleur ne provoque pas prématurément leur rétrécissement.



Figure 3-56. Étape 8.

Faites glisser un des morceaux de gaine sur l'une des soudures et appliquez le pistolet à air chaud (figure 3-57). Ne laissez pas le flux d'air chaud atteindre les autres morceaux de gaine.



Figure 3-57. Étape 9.



Figure 3-58. Étape 10.

La gaine est maintenant rétractée.

Vous pouvez procéder à la soudure de la seconde paire de conducteurs (figures 3-59 et 3-60). Après l'avoir protégée avec son propre morceau de gaine, vous devez faire glisser la plus grosse gaine pour qu'elle recouvre l'ensemble.

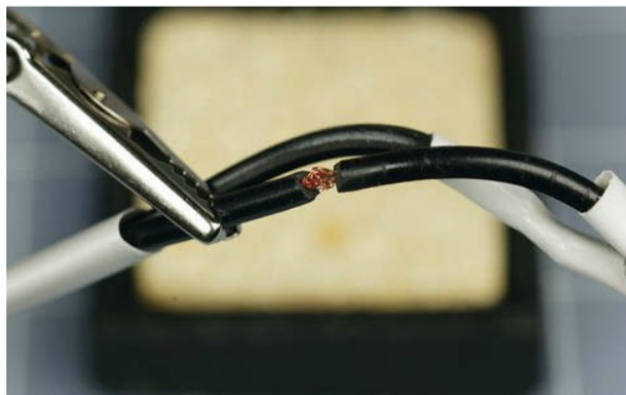


Figure 3-59. Étape 11.

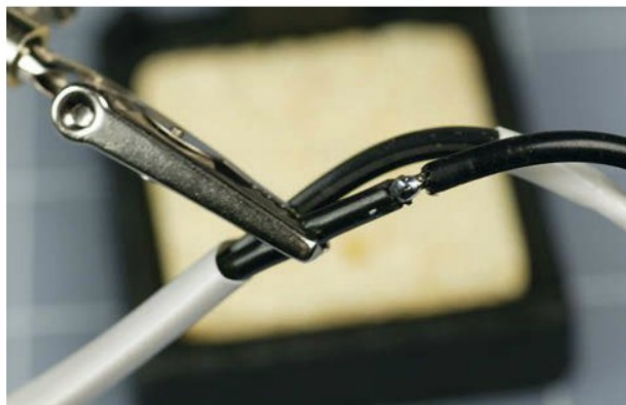


Figure 3-60. Étape 12.



Figure 3-61. Le cordon d'alimentation est raccourci.

Vous possédez maintenant les bases suffisantes pour réaliser votre premier circuit soudé. Mais avant cela, nous allons observer les conséquences d'une surchauffe non intentionnelle. Il ne faudrait pas que vous soudiez des éléments entre eux, pour découvrir ensuite que vous avez détérioré un transistor ou une LED.

Expérience 13 : grillez une LED !

Avec l'expérience 4, vous avez appris combien il était facile de faire griller une LED. Rappelez-vous : un courant trop important traversait la LED, générant une chaleur excessive qui a littéralement détruit le composant.

Si la chaleur produite par un courant électrique peut détruire une LED, il est probable que la chaleur provenant d'un fer à souder puisse provoquer le même effet. Vérifions-le.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V et son connecteur, ou un adaptateur secteur 9 V
- Pince plate standard ou à bec long
- Fer à souder de 30 W ou 40 W
- Fer à souder de 15 W
- 2 LED génériques
- 1 résistance de 470 Ω
- 1 troisième main pour maintenir votre travail
- 1 pince crocodile de taille normale ou deux petites pinces crocodile en cuivre

Cette expérience propose l'étude des effets de la chaleur. Nous devons donc savoir où la chaleur est transmise.

Pour cela, vous n'allez pas utiliser une plaque de montage. Ses contacts internes absorberaient une quantité de chaleur indéterminée. Il est déconseillé d'utiliser des fils de test, pour la même raison.

Utilisez votre pince plate pour plier chacun des fils d'une LED et former des petits crochets. Répétez l'opération avec les fils d'une résistance de 470 Ω (figure 3-62). Pour conserver cette forme en crochet, vous devrez peut-être les dénuder un peu plus et étamer leurs extrémités.

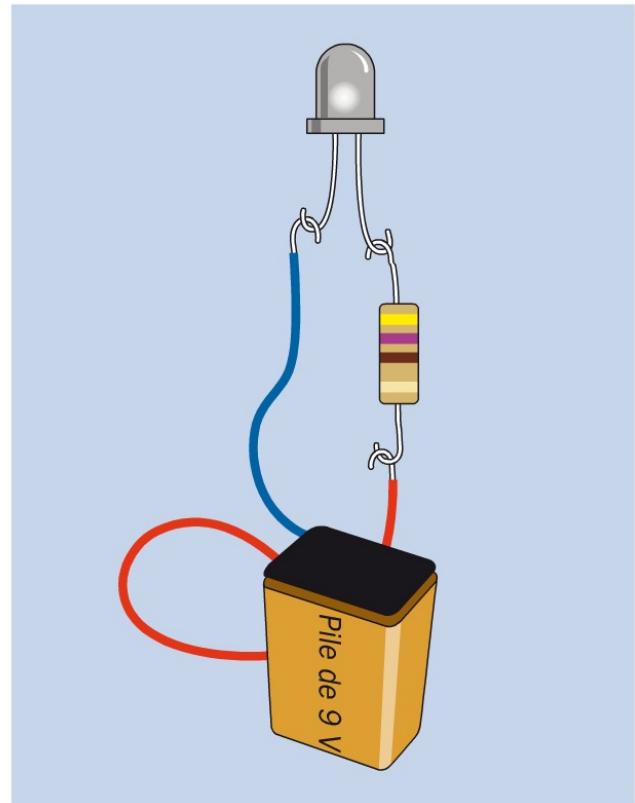


Figure 3-62. Évaluation de la tolérance à la chaleur d'une LED. La pile de 9 V peut être remplacée par un adaptateur secteur.

Afin de minimiser les pertes de chaleur par conduction, la résistance est accrochée à l'un des fils de la LED, et le fil d'alimentation est pendu à l'autre fil. La gravité devrait permettre que cela fonctionne.

Accrochez le corps en plastique de la LED à la troisième main. Le plastique n'étant pas un bon conducteur de la chaleur, la lentille de la LED ne devrait pas évacuer une quantité de chaleur significative vers la troisième main.

Appliquez la tension d'alimentation. Votre LED doit alors s'illuminer.

Vous allez devoir utiliser vos deux fers à souder. Branchez-les et attendez au moins 5 minutes, afin qu'ils soient bien chauds. Puis maintenez fermement la panne du fer à souder de 15 W en contact avec l'un des fils de la LED et chronométrez le temps écoulé (figure 3-63).

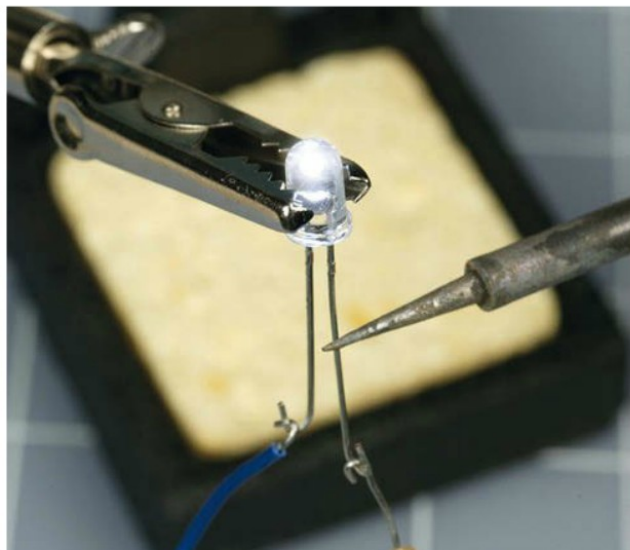


Figure 3-63. Transmission de la chaleur produite par un fer à souder de 15 W.

Vous pouvez maintenir ce contact pendant au moins trois minutes sans endommager la LED. C'est la raison pour laquelle un fer à souder de 15 W est recommandé.

Laissez refroidir le fil de la LED, puis appliquez votre fer à souder le plus puissant au même endroit que précédemment. Vous allez constater que la LED cesse de briller après un temps très court, d'environ 10 secondes (sachez toutefois que certaines LED résistent à une température plus élevée que d'autres). C'est pour cela que *vous ne devez pas utiliser* un fer à souder de 30 W.

Le gros fer à souder n'atteint pas nécessairement une température plus élevée que le plus petit fer. Il a simplement un pouvoir calorifique plus élevé. En d'autres termes, il peut transmettre une quantité de chaleur plus importante, à un rythme plus élevé.

Votre LED a été sacrifiée pour satisfaire votre curiosité. Jetez-la et remplacez-la par une LED neuve, que nous allons essayer de traiter plus délicatement. Reliez-la comme la précédente mais, cette fois, ajoutez une pince crocodile de taille normale en cuivre (ou deux petites) à l'un des fils de la LED, près de son corps (figure 3-64). Appliquez la panne du fer à souder de 30 W ou de 40 W sur le fil juste en dessous de la pince crocodile. Cette fois, la LED devrait permettre au fer à souder de rester ainsi pendant deux minutes, sans être détruite.

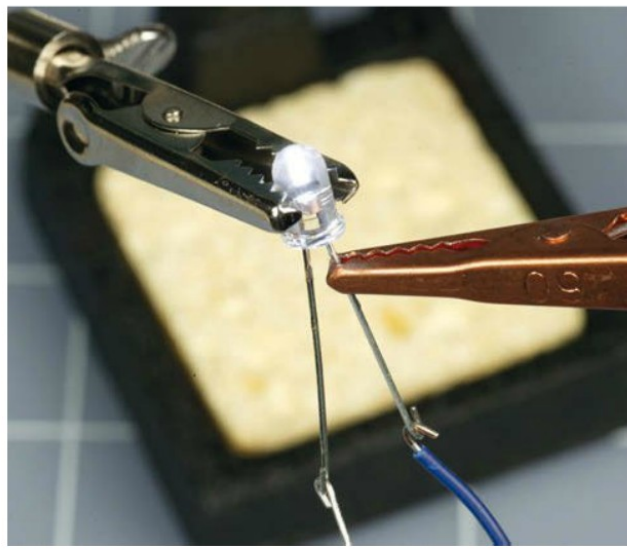


Figure 3-64. Utilisation d'une pince crocodile comme radiateur pour protéger une LED.

Où la chaleur est-elle évacuée ?

À l'issue de votre expérience, si vous touchez la pince crocodile, vous pourrez constater qu'elle est assez chaude, alors que la LED ne l'est pas autant. Vous pouvez imaginer la chaleur s'écoulant au travers de la panne du fer à souder, vers le fil de la LED, puis vers la LED ; elle rencontre la pince crocodile sur son passage (figure 3-65). La pince crocodile se comporte comme un réservoir vide en attente d'être rempli. La chaleur préfère s'écouler dans le cuivre de la pince crocodile, laissant la LED saine et sauve.

La pince crocodile se comporte comme un *dissipateur thermique*. Elle est plus efficace qu'une pince crocodile ordinaire en acier nickelé, car le cuivre est meilleur conducteur de la chaleur.

Revenons à la première partie de cette expérience, où vous avez pu constater que le fer de 15 W ne détruisait pas la LED, et sans qu'aucun dispositif d'évacuation de la chaleur ne soit nécessaire. Pour autant, cela signifie-t-il qu'un fer à souder de 15 W est totalement sans danger ?

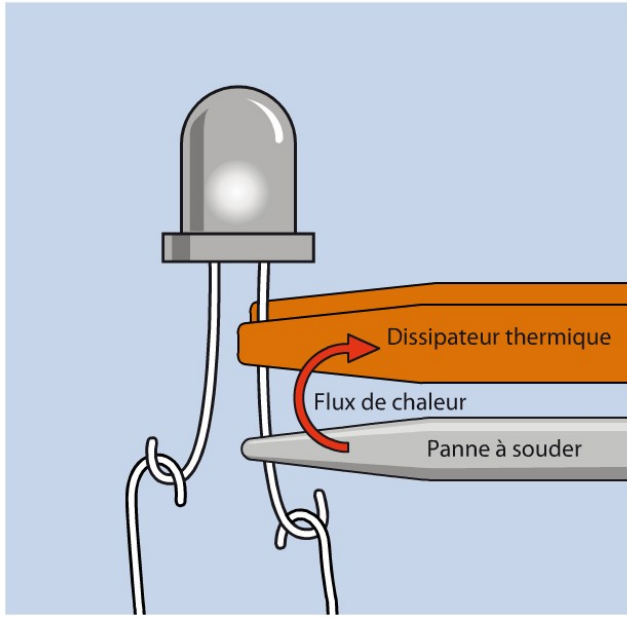


Figure 3-65. Une pince crocodile en cuivre évacue la chaleur en dehors de la LED.

C'est possible ! En réalité, le problème est lorsqu'on ignore que certains semi-conducteurs sont plus sensibles à la chaleur que les LED.

Lorsqu'un composant est détruit, c'est très désagréable, je vous conseille d'agir prudemment et de toujours placer un dissipateur thermique dans les circonstances suivantes :

- Si vous appliquez un fer à souder de 15 W très près d'un semi-conducteur, pendant au moins 20 secondes.
- Si vous appliquez un fer à souder de 30 W à 1,5 cm d'une résistance ou d'un condensateur pendant 10 secondes ou plus (ne jamais utiliser ce fer à proximité de semi-conducteurs).
- Si vous appliquez un fer de 30 W près d'un composant susceptible de fondre, pendant 20 secondes ou plus. Parmi ces matériaux figurent les gaines isolantes des fils, les connecteurs en plastique et les parties en plastique à l'intérieur des interrupteurs.

Règles de la dissipation thermique

- Les pinces crocodiles en cuivre de taille normale conviennent très bien, l'idéal étant de disposer également de petites pinces crocodiles.

- Agripper la pince crocodile aussi près que possible du composant et le plus loin possible du point de soudure que vous réalisez. Le point de soudure a, en effet, besoin d'être chaud. Vous devez détourner la chaleur du composant, pas de la partie à souder.
- Assurez-vous que la liaison de la pince crocodile se fait bien sur une partie métallique du fil afin de permettre un bon transfert de la chaleur.

Si vous gardez en mémoire ces quelques recommandations, nous pouvons maintenant passer à la réalisation du câblage point à point.

Expérience 14 : une lumière pulsée pour vêtement

Jusqu'à présent, je vous ai encouragé à assembler vos composants avec peu de théorie et sans réelle planification. C'est ce que l'apprentissage par la découverte sous-entend. Parfois, cependant, un plan est essentiel. Je vais d'abord définir les contraintes de ce projet, puis je vous guiderai pas à pas dans sa réalisation.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V et son connecteur, ou un adaptateur secteur 9 V CC
- Du fil de câblage, une pince coupante, une pince à dénuder et un multimètre
- 1 fer à souder de 15 W
- De la soudure fine (0,6 mm)
- 1 plaque perforée non cuivrée
- 1 support troisième main
- Les résistances suivantes : 470 Ω (2), 100K (1), 4,7K (2), 470K (2)
- Les condensateurs suivants : 3,3 μ F (2), 220 μ F (1)
- 3 transistors 2N2222
- 1 LED générique

Retour au circuit oscillant

Revenez à la figure 2-116 afin de vous remémorer ce circuit. Vous devez maintenant le réaliser en le miniaturisant au maximum, afin de pouvoir le fixer sur son vêtement.

Imaginez que les fils de vos composants sont reliés entre eux par des élastiques, vous permettant ainsi de les mélanger sur votre table, sans perdre leurs interconnexions. Lorsque les élastiques sont rétrécis au maximum, le circuit est le plus petit possible et vous pouvez relier les composants à l'aide de fils nus, en disposant l'ensemble sur un morceau de plaque perforée.

Il reste un problème à résoudre : les fils nus ne peuvent pas se croiser. Après avoir réalisé et vérifié le fonctionnement de ce circuit, vous pourriez le confier à un service de gravure de circuits imprimés.

Les circuits imprimés modernes comportent au minimum deux couches, beaucoup ayant également des couches internes, permettant ainsi aux conducteurs de se croiser sans être en contact. Il est cependant préférable de commencer par quelque chose de traditionnel et de simple. Le circuit imprimé le plus élémentaire comporte des composants sur une face et les liaisons sur l'autre.

Les composants sur la face supérieure peuvent être disposés au-dessus des conducteurs de la face inférieure, car ils sont séparés par l'isolant de la plaque perforée. En revanche, les liaisons ne peuvent pas se croiser.

La figure 3-66 montre le circuit miniaturisé que j'ai réalisé, sur un morceau de plaque perforée vierge mesurant environ 23 × 33 mm. Si vous parvenez à réduire encore ses dimensions, c'est parfait. Voici quelques idées pour y parvenir :

- utiliser des résistances de 1/8 W au lieu de 1/4 W ;
- monter les résistances verticalement ;
- insérer deux fils par trou, si les trous de votre plaque le permettent.

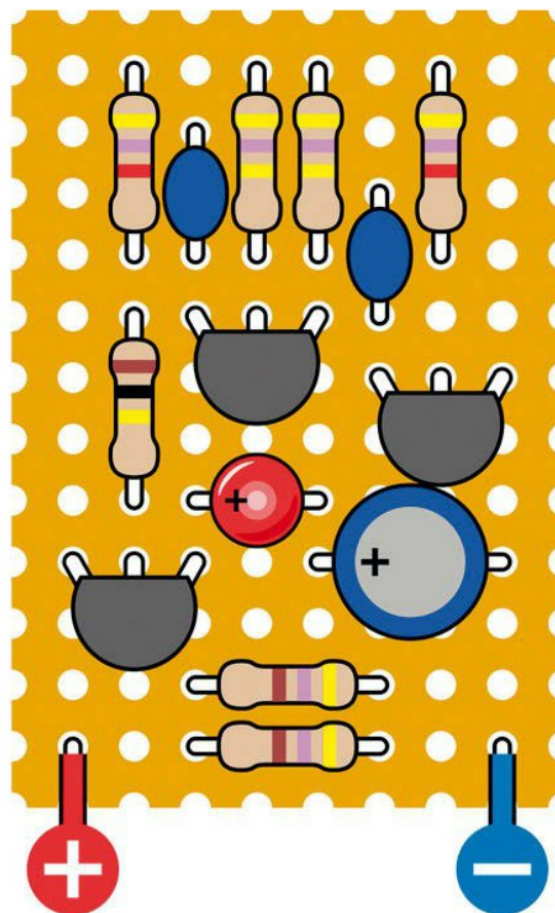


Figure 3-66. Le circuit oscillant miniaturisé afin d'occuper un minimum d'espace sur une plaque perforée.

Où sont les liaisons entre les composants ? Elles sont sous la plaque. Sur la figure 3-67, j'ai grisé les composants et fait disparaître la plaque, afin que vous puissiez voir le câblage.

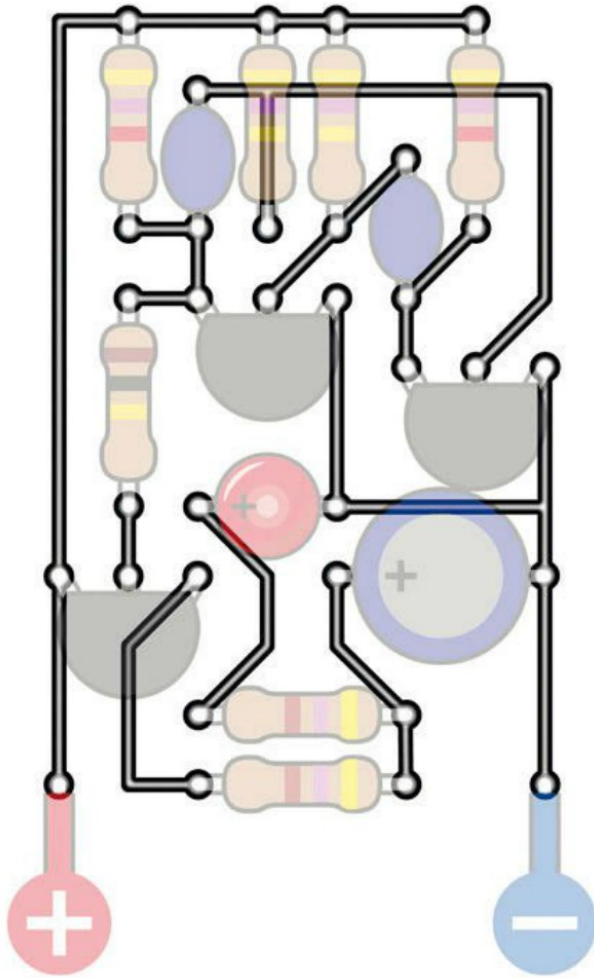


Figure 3-67. Les connexions en noir sont des fils disposés sous la plaque du circuit, qui est transparente sur cette vue.

Si vous comparez attentivement ce plan avec le schéma de la figure 2-116, vous verrez que les liaisons entre les composants sont identiques.

La figure 3-68 montre une vue différente de ce circuit ; cette fois, les composants sont supprimés, mais la plaque est représentée avec les connexions qui suivent la grille des perforations de $2,54 \times 2,54$ mm.

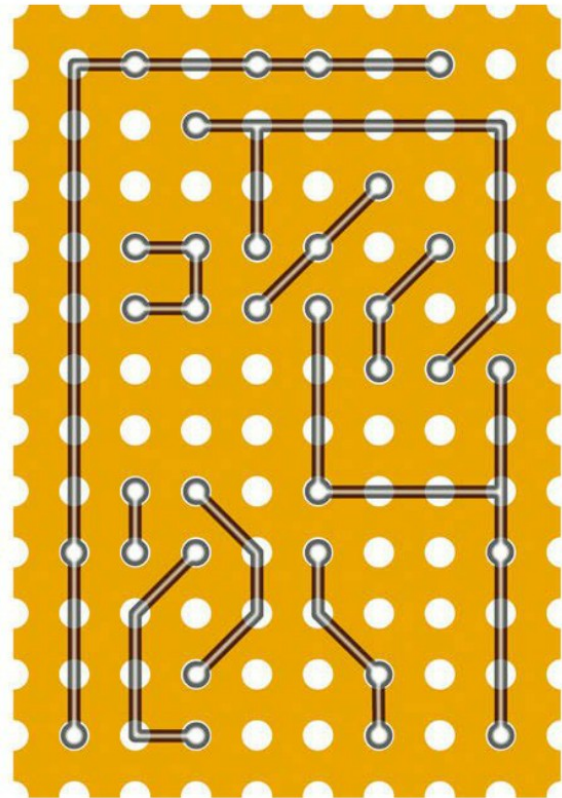


Figure 3-68. Seules la plaque et les connexions sont visibles. Chaque petit cercle gris représente une broche de connexion traversant un trou.

Pour terminer, la figure 3-69 montre une vue de dessous de la plaque retournée selon l'axe vertical. Ceci devrait vous aider à réaliser les connexions lorsque vous assemblez les composants.

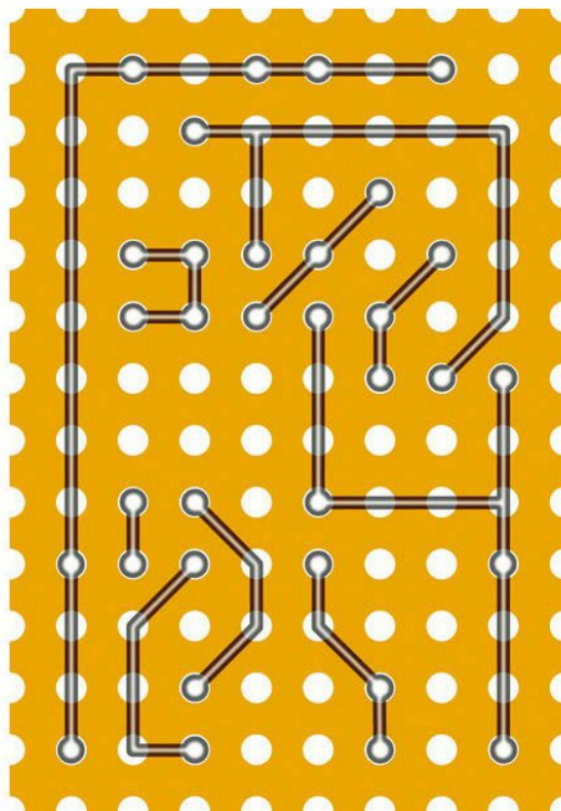


Figure 3-69. Le plan de câblage précédent est inversé horizontalement, afin de montrer la plaque vue du dessous.

Pliez les fils et ajoutez la soudure

Maintenant que vous avez le plan de cette réalisation, comment allez-vous réaliser toutes ces liaisons ?

Ce n'est pas si difficile. Les résistances, les condensateurs et les transistors ont des sorties à fils qui mesurent, en général, plus de 1,5 cm de long. Vous pouvez donc les insérer dans les trous de la plaque, puis replier les fils pour qu'ils entrent en contact. Une fois qu'ils se touchent, vous pouvez les souder. Coupez le surplus de longueur des fils et ajoutez pour finir, les liaisons du connecteur de la pile.

Il est important de respecter ces trois précautions :

- Maintenir la plaque fixe pendant votre travail n'est pas facile ; soyez patient et précautionneux. Aidez-vous de votre troisième main, si nécessaire.
- Les soudures que vous allez réaliser sont très proches des composants. Utilisez vos pinces crocodiles en cuivre pour protéger ces derniers.

- L'inversion entre la face supérieure et la face inférieure peut prêter à confusion. Vous pourriez facilement placer un fil au mauvais endroit. C'est à mon avis la partie la plus difficile.

Vous avez peut-être vu des plaques perforées possédant des pastilles de cuivre autour des trous. Elles ont l'avantage de maintenir les composants fermement en place, mais elles peuvent également provoquer des courts-circuits avec les fils voisins. Pour un petit circuit comme celui-ci, une plaque vierge est plus pratique (figure 3-22). La taille des trous d'une plaque perforée peut être variable, mais leur utilisation reste la même.

Pas à pas

Voici la procédure spécifique à suivre, pour réaliser ce circuit :

- Découpez un morceau de plaque perforée de 23 × 33 mm (comptez simplement les rangées de trous de la plaque). Vous pouvez utiliser une scie miniature pour le modélisme, ou casser la plaque le long des rangées de trous si vous êtes minutieux. Vous pouvez également utiliser une scie à métaux, mais pas une scie à bois, car les plaques perforées sont souvent faites avec des fibres de verre et cela pourrait émousser la scie.
- Réunissez tous les composants et insérez-en trois ou quatre avec précaution, dans les trous de la plaque, en comptant les trous afin d'être sûr qu'ils sont au bon emplacement. Retournez la plaque et pliez les fils des composants pour les maintenir en place, puis créez les liaisons de la figure 3-69. Si l'un des fils n'est pas assez long, ajoutez un morceau de fil de câblage, sans sa gaine isolante.
- Coupez les fils qui dépassent à l'aide de votre pince coupante.
- Réalisez les soudures avec votre fer.
- Vérifiez à l'aide d'une loupe chaque point de soudure en les manipulant avec le bec de la pince pliante. S'il n'y a pas assez de soudure pour que la connexion soit assurée, chauffez-la à nouveau et ajoutez-en un peu. Si la soudure a créé accidentellement une liaison qui ne doit pas exister, utilisez un cutter pour éliminer le surplus qui établit le contact.

En général, il vaut mieux travailler avec seulement trois ou quatre composants à la fois ; le risque de se tromper augmente avec le nombre de composants. Si un

composant est mal positionné, il est beaucoup plus difficile de rectifier l'erreur si celui-ci est déjà entouré d'autres composants.



Projection de petits morceaux de fil

Les mâchoires des pinces coupantes exercent une force importante lorsque vous coupez un fil, ce qui peut provoquer l'éjection du morceau sectionné. Certains fils sont assez souples et ne posent pas de problème, mais les transistors et les LED ont en général des fils assez rigides. Des petits segments peuvent alors être projetés de façon imprévisible et vous blesser l'œil par exemple.

Il est donc conseillé de porter des lunettes de sécurité quand vous coupez un fil.

Terminez votre travail

Un éclairage puissant n'est pas un luxe, mais une nécessité. Vous pouvez utiliser une lampe de bureau équipée d'une LED lumière du jour, car elle permet de bien distinguer les bandes colorées sur les résistances.

Quelle que soit votre acuité visuelle, vous devez utiliser une loupe pour examiner les soudures. Vous serez surpris du degré d'imperfection de certaines d'entre elles. Maintenez la loupe aussi proche que possible de votre œil, prenez ensuite la plaque de votre circuit et approchez-la jusqu'à ce que le point de soudure que vous vérifiez devienne net.

Vous devriez ainsi obtenir un circuit fonctionnel qui bat comme un cœur. Si vous éprouvez des difficultés à le faire fonctionner, suivez chaque connexion et comparez-la au schéma. Si vous ne trouvez aucune erreur, mettez votre circuit sous tension, reliez le fil noir de votre multimètre au pôle négatif de l'alimentation, puis reliez le fil rouge à différents points du circuit. Chaque partie du circuit devrait indiquer une tension lorsque celui-ci fonctionne. Si vous découvrez qu'une liaison manque, vous avez peut-être une soudure sèche ou tout simplement absente.

Vous pouvez maintenant imaginer la façon de transformer ce circuit en objet vestimentaire.

Une pile de 9 V est nécessaire pour faire fonctionner votre circuit, ce qui constitue une contrainte importante d'encombrement.

Trois possibilités :

- Placez la pile dans une poche, le circuit étant relié à cette poche par un fil très fin traversant le tissu.
- Vous pouvez installer la pile dans une casquette, le circuit étant fixé à l'avant de la casquette.
- Vous pouvez relier trois piles boutons de 3 V en série maintenues par une sorte de pince en plastique.

Pour ce projet, le transistor 2N2222 n'est pas un choix idéal, car il tend à utiliser plus de puissance qu'un transistor à effet de champ, également connu sous le sigle MOSFET. Mais nous ne traitons dans ce livre qu'une seule sorte de transistors : le type NPN bipolaire, qui est la catégorie la plus usuelle.

En ce qui concerne le choix de la LED, un modèle ayant une lentille transparente ne fournit pas une lumière adéquate pour cet objet. Celles possédant une lentille diffusant la lumière offriront un clignotement plus agréable. Vous pouvez augmenter la diffusion de la lumière en plaçant la LED derrière une pièce en plastique transparent d'au moins 5 mm d'épaisseur (figure 3-70). Vous pourrez rayer la surface du plastique avec du papier de verre fin ou, mieux, à l'aide d'une ponceuse excentrique qui ne laissera pas de trace. Cela rendra le plastique translucide et non plus transparent.

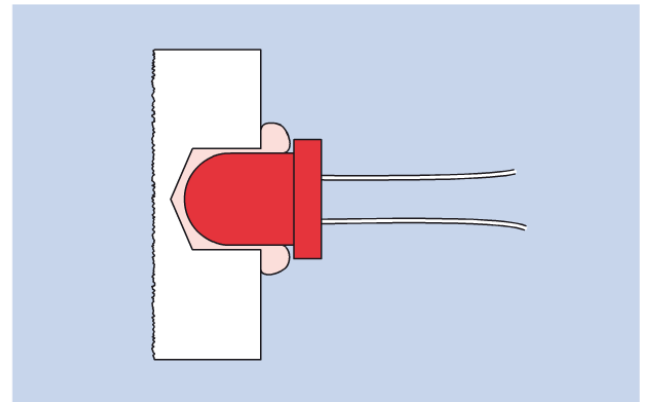


Figure 3-70. Cette vue en coupe montre un morceau de feuille de plastique dans lequel un trou borgne a été percé. Le trou étant conique au fond et la LED arrondie à son extrémité, utilisez un peu de colle époxy ou de joint silicone transparent pour maintenir la LED en place.

Percez un trou légèrement plus grand que le diamètre de votre LED au dos de la pièce de plastique. Retirez tous les copeaux et la poussière du trou en soufflant dessus à l'aide d'un compresseur ou en le lavant. Une fois le trou sec et propre, versez au fond un peu de joint silicone ou

un mélange de colle époxy rapide, avant d'insérer la LED, ce qui évacue le surplus de colle ; ce dernier va former une collerette qui va maintenir la LED.

Essayez d'allumer la LED, puis rayez la surface si nécessaire. Pour terminer, il vous reste à décider si vous allez installer le circuit au revers du tissu ou si vous préférez le relier ailleurs par un câble de liaison.

Vous pouvez choisir la valeur des résistances du circuit afin qu'il oscille au rythme d'un cœur humain au repos. Cela permettrait de faire croire qu'il est contrôlé par le battement de votre cœur, en particulier si vous le placez sur votre poitrine ou si vous le portez comme un bracelet autour de votre poignet. Si vous êtes farceur, vous pourrez faire croire que vous êtes dans une forme si éblouissante que votre rythme cardiaque reste régulier, même en faisant des efforts intenses.

Je vous laisse décider de la meilleure manière de dissimuler votre circuit, car c'est un livre d'électronique, pas de bricolage. Il y a toutefois un aspect lié au DIY que je voudrais évoquer maintenant.

Historique : le casse-tête des unités de mesure

En électronique, vous rencontrerez aussi bien des mesures en millimètres qu'en pouces, et ce, parfois dans la même fiche technique. Par exemple, l'espacement entre les pattes d'un composant monté en surface est le plus souvent exprimé en millimètres, alors que les composants traversants ont leurs broches espacées de 0,1 pouce (2,54 mm) et cela restera probablement ainsi. Pour compliquer un peu plus le sujet, quand les pouces sont utilisés, il y a deux façons de les fractionner en dimensions intermédiaires. Par exemple, les forets sont mesurés en multiples de 1/64 de pouce et les cales métalliques sont graduées en 1/1 000 de pouce. Pour compliquer encore davantage, l'épaisseur des feuilles de métal est exprimée en « jauge », par exemple la jauge 16 pour l'acier, représentant une épaisseur de 1/16 de pouce (environ 1,6 mm).

Pourquoi n'utilise-t-on pas le système métrique aux États-Unis, alors qu'il est bien plus rationnel ?

On peut discuter longuement du fait qu'il soit plus rationnel. Quand il a été officiellement introduit en 1875, le mètre représentait 1/10 000 000 de la distance entre le pôle nord et l'équateur, selon une ligne passant par Paris. Pourquoi Paris ? Tout simplement parce que les Français

avaient émis cette idée. Depuis, le mètre a été redéfini trois fois, avec le souci de le rendre plus précis pour les applications scientifiques.

Bien que le déplacement de la virgule dans le système à base 10 soit plus simple que le calcul de fractions en 1/64 de pouce, la raison pour laquelle nous comptons en dizaines provient du fait que nous avons dix doigts à nos mains. Un système à base 12 aurait été plus pratique, car tous les nombres auraient été divisibles par 2 et 3.

Le fait est que nous sommes piégés par ce conflit entre les unités de mesure. J'ai donc créé quatre tableaux pour vous aider à convertir d'un système à l'autre. Vous pourrez déduire de ces tableaux que si vous devez percer un trou de 3/16 de pouce, un foret de 5 mm devrait convenir. En fait, le diamètre d'un trou de 3/16 pouce (4,76 mm) sera légèrement plus petit que 5 mm.

La figure 3-71 vous aidera à convertir les 1/64 et les 1/100 de pouce. La colonne grisée est divisée en 1/64, la colonne bleue en 1/32, la colonne verte en 1/16 et la colonne orange en 1/8.

Beaucoup de fiches techniques exprimant les dimensions en fractions décimales de pouce, une seconde table (figure 3-72) permet la conversion entre les fractions décimales et les 1/64 pouce. Je pense que vous rencontrerez fréquemment une dimension telle que 0,375 pouce ; savoir que c'est égal à 3/8 pouce peut être utile.

Beaucoup de fiches techniques expriment les dimensions en millimètres et en pouces, mais certaines n'utilisent plus que les millimètres. Si vous raisonnez toujours en pouces, ou si vous souhaitez savoir si un composant pourra s'insérer dans des trous espacés de 0,1 pouce sur une plaque de montage ou une plaque perforée, il est pratique de se souvenir que 1/10 pouce est équivalent à 2,54 mm. Si l'on considère qu'un composant est petit, un espacement de 2,5 mm est acceptable. Cependant, si les broches sont espacées de 25 mm, elles pourraient ne pas pouvoir être insérées dans des trous espacés de 25,4 mm (c'est-à-dire un pouce).

La figure 3-73 permet la conversion entre les millimètres et les 1/100 de pouce et les 1/64 de pouce.

La figure 3-74 est une vue agrandie du tableau précédent, montrant la conversion en les 1/10 de mm et les 1/1 000 de pouce.

Des progrès ont été accomplis ces quarante dernières années pour favoriser l'adoption du système métrique aux États-Unis, mais plusieurs décennies devront encore

s'écouler avant que la transition ne soit terminée. En attendant, quiconque utilise des pièces ou vend des outils aux États-Unis doit se familiariser avec les deux systèmes. Il n'y a pas d'échappatoire.

8	16	32	63	
		31	61	
	15		59	
7		29	57	90
		27	55	
	13	25	53	80
3/4			51	
		23	49	
	11	21	47	70
5			45	
		19	43	
	9	17	41	60
1/2			39	
		15	37	
	7	13	35	50
		11	33	
3			31	
	5	9	29	40
		7	27	
1/4			25	
	3	5	23	30
		1	21	
			19	
	1	3	17	20
			15	
		1	13	
64° de pouce			11	10
			9	
			7	
			5	
			3	
			1	
				Centièmes de pouce

Figure 3-71. Conversion entre 64° et 100° de pouce.

		,9688	,9844	63	32	16	8
			,9531	61	31		
	,9375		,9219	59		15	
		,9063	,8906	57	29		
,875			,8594	55			7
		,8438	,8281	53	27		
	,8125		,7969	51		13	
		,7813	,7656	49	25		3/4
,75			,7344	47			
		,7188	,7031	45	23		
	,6875		,6719	43		11	
		,6563	,6406	41	21		
,625			,6094	39			5
		,5938	,5781	37	19		
	,5625		,5469	35		9	
		,5313	,5156	33	17		1/2
,5			,4844	31			
		,4688	,4531	29	15		
	,4375		,4219	27		7	
		,4063	,3906	25	13		
,375			,3594	23			3
		,3438	,3281	21	11		
	,3125		,2969	19		5	
		,2813	,2656	17	9		1/4
,25			,2344	15			
		,2188	,2031	13	7		
	,1875		,1719	11		3	
		,1563	,1406	9	5		
,125			,1094	7			1
		,0938	,0781	5	3		
	,0625		,0469	3		1	
Valeur décimale		,0313	,0156	1	1		64° de pouce

Figure 3-72. Conversion entre 64° de pouce et valeurs décimales.

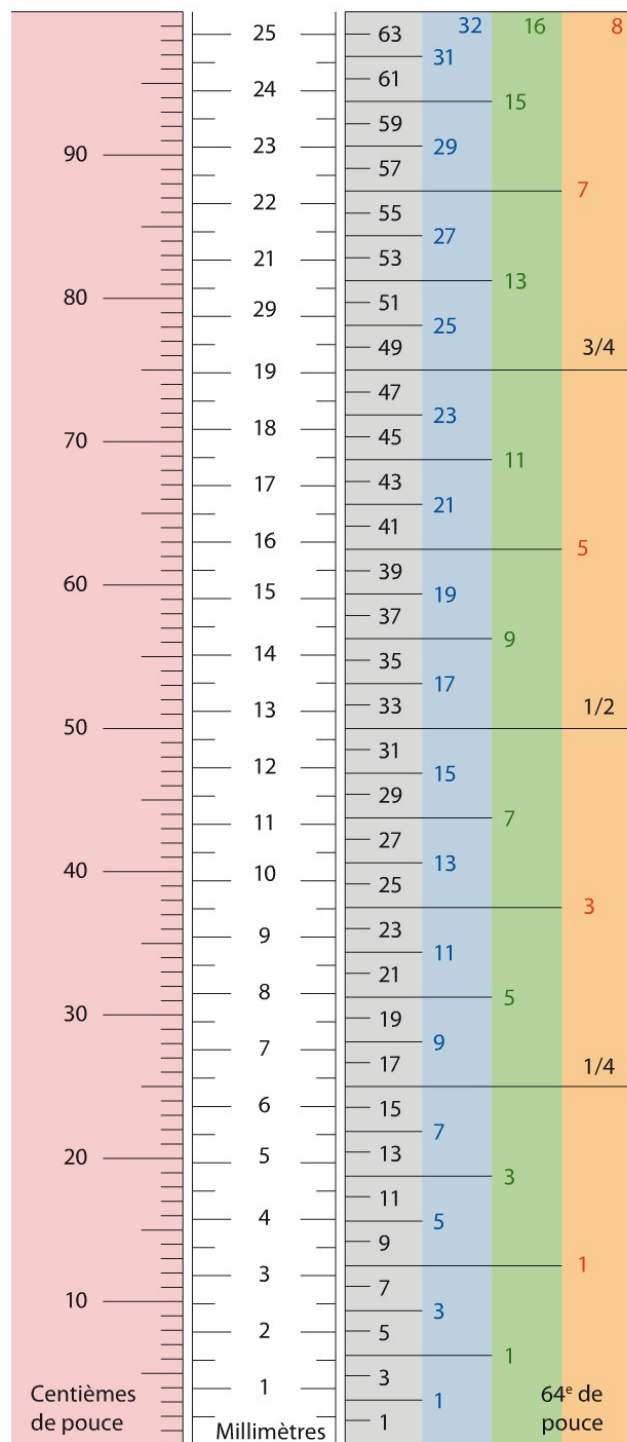


Figure 3-73. Conversion entre unités anglo-saxonnes et unités métriques (millimètres).

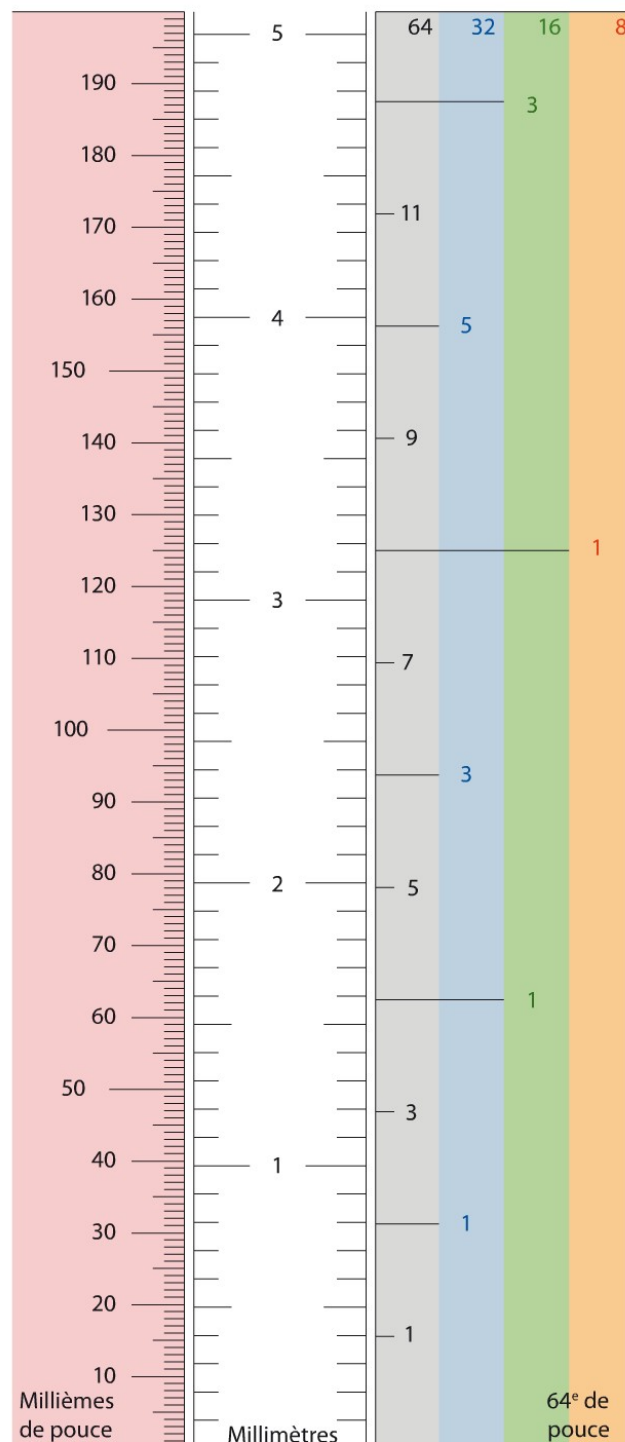


Figure 3-74. Conversion entre des petites valeurs en pouce et les millimètres (en dixièmes de millimètre).

Expérience 15 : alarme anti-intrusion, première partie

Il est temps de mettre en pratique vos connaissances pour réaliser un système très répandu, simple mais fonctionnel. Réaliser une alarme anti-intrusion est une excellente introduction aux circuits qui accomplissent une tâche réelle.

Créer un circuit à partir de rien est une source de problèmes inattendus et d'erreurs. C'est pourquoi, dans la séquence des opérations décrite à la suite, nous ferons des pauses et des retours en arrière, jusqu'à ce que, finalement, nous parvenions à un système fonctionnel et fiable.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pile de 9 V et son connecteur, ou un adaptateur secteur 9 V CC
- 1 plaque de montage, du fil de câblage, une pince coupante, une pince à dénuder et un multimètre
- 1 LED générique
- 1 transistor 2N2222
- 1 relais DPDT 9 V CC
- 1 diode 1N4001
- 1 résistance de chacune des valeurs suivantes : 470 Ω , 1K et 10K

Cahier des charges

Cette expérience est suffisamment complexe pour nécessiter un plan, mais auparavant, il faut savoir exactement ce que l'on veut. Cela nécessite d'écrire ce qu'on appelle un cahier des charges, qui est une liste de ce qu'on attend du système à créer. Au cours du projet, j'essaierai de visualiser comment chaque exigence peut être satisfaite avec les composants déjà utilisés dans les expériences précédentes.

Quelles sont donc les exigences d'un système d'alarme ?

1. **Dispositif de déclenchement.** L'appareil doit détecter si quelqu'un est entré dans la propriété. Un système sophistiqué utilisant un rayon laser ou des ultrasons serait idéal, mais trop compliqué. Étant donné qu'il s'agit de notre première approche, je me contenterai des interrupteurs magnétiques pour fenêtres et portes.
2. **Dispositif sonore.** Pour alerter, l'alarme doit émettre un son modulé reconnaissable.
3. **Autoprotection.** Personne ne doit pouvoir arrêter le système en coupant un fil. En fait, la protection devrait déclencher l'alarme.
4. **Capteurs reliés en série.** Afin d'assurer une protection efficace, je peux faire circuler un très faible courant à travers plusieurs interrupteurs fermés et reliés en série. Si l'un des interrupteurs s'ouvre, ou si le fil qui les relie est coupé, le courant sera interrompu ce qui déclenchera l'alarme. Les alarmes filaires sont le plus souvent conçues selon ce principe.
5. **Déclenchement de l'alarme.** Puisque j'utilise des capteurs magnétiques en série, une situation d'alerte due à l'ouverture d'un des contacts doit déclencher l'alarme. Un relais bipolaire pourrait s'en charger. Le courant qui traverse la bobine maintiendrait une paire de contacts ouverts, jusqu'à ce que le passage du courant soit interrompu ; les contacts du relais mis au repos se fermeraient alors. Cependant, le relais absorberait une quantité de courant non négligeable en mode veille, ce qui exclurait qu'il soit alimenté par une pile ou une batterie. Un bon système d'alarme ne doit pas dépendre de la présence du secteur électrique.
6. **Utilisation possible d'un transistor.** Si je n'utilise pas un relais, un transistor pourrait se charger du déclenchement de l'alarme, lorsque le circuit des capteurs est interrompu. La base d'un transistor serait maintenue à un potentiel faible jusqu'à ce que le circuit soit interrompu. La tension augmenterait alors et le transistor serait conducteur.
7. **Mise en veille de l'alarme.** Je souhaite qu'un voyant soit allumé lorsque toutes les issues sont fermées. Cela m'indiquera que l'alarme est prête pour sa mise en veille. Je veux alors pouvoir appuyer sur un bouton qui démarre un compte à rebours d'une minute, pour me permettre de sortir. Après une minute, l'alarme sera en veille.
8. **Maintien automatique.** Une fois l'alarme déclenchée, je ne veux pas qu'elle puisse s'arrêter facilement. Si quelqu'un ouvre une fenêtre, l'alarme sonore doit continuer à retentir, même si la personne referme la fenêtre. Un transistor pourrait peut-être commander un relais qui se maintiendrait automatiquement enclenché ? Un transistor pourrait-il s'en charger ?

9. **Délai initial.** Je ne veux pas que l'alarme sonne se déclenche immédiatement lorsque je rentre dans la zone protégée. Un délai d'une minute est nécessaire pour que je puisse atteindre le système et l'arrêter. Si l'alarme n'est pas désactivée durant ce délai, elle doit alors retentir.
10. **Désactivation par un code.** Une sorte de clavier à code secret serait une bonne idée pour désactiver l'alarme.

Mise en œuvre du cahier des charges

Cette liste de fonctions semble bien ambitieuse si l'on se souvient que, jusqu'à présent, vous n'avez construit qu'un oscillateur utilisant trois transistors. Pourtant, ces fonctions sont pour la plupart facilement réalisables. Je garderai les plus difficiles pour la fin de ce livre, lorsque vous aurez élargi vos connaissances de base. Lorsque vous aurez mis en œuvre toutes les fonctionnalités de ce cahier des charges et l'ensemble tiendra sur une plaque de montage, à l'exception de la sirène électronique qui reste optionnelle.

Les capteurs magnétiques

Commençons par l'élément qui assurera le déclenchement de l'alarme. Un interrupteur magnétique est constitué de deux parties : le module magnétique et le module interrupteur (figure 3-75).



Figure 3-75. Capteur d'alarme constitué d'un aimant enfermé dans un boîtier plastique et d'un interrupteur magnétique « reed » logé dans un boîtier identique.

Le module magnétique contient un aimant permanent et rien d'autre. Le module interrupteur contient un *interrupteur reed*, qui établit ou interrompt un contact – comme le contact interne d'un relais – sous l'influence de l'aimant.

Le module magnétique doit être fixé sur la partie mobile de la porte, ou de la fenêtre, et le module interrupteur au châssis de l'ouverture. Lorsque la fenêtre ou la porte est fermée, le module magnétique est presque en contact avec le module interrupteur. L'aimant maintient le contact fermé jusqu'à ce que la porte ou la fenêtre, et donc le contact, s'ouvrent (figure 3-76).

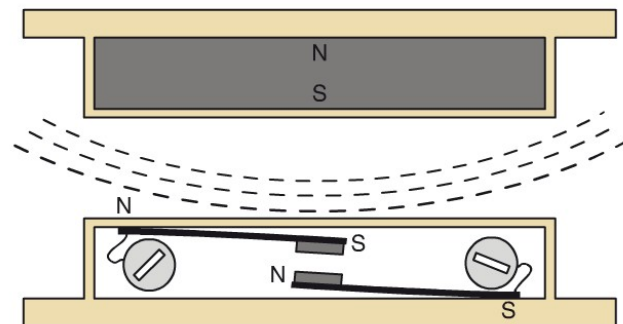


Figure 3-76. Cette vue en coupe montre les deux parties d'un capteur d'alarme traditionnel : un interrupteur reed (en bas) et l'aimant qui l'active (en haut).

L'interrupteur est constitué de deux lames flexibles magnétisables qui se terminent par un contact électrique. Chaque lame est reliée à une vis de connexion externe auquel un fil peut être relié.

Quand l'aimant s'approche de l'interrupteur, il magnétise les lames qui s'attirent mutuellement jusqu'à ce que le contact se ferme.

Selon cette description, vous pouvez déduire que l'interrupteur est normalement ouvert (NO), mais qu'il est maintenu fermé par le champ magnétique. Si vous achetez des capteurs d'alarme, sachez que certains contiennent un interrupteur *reed* au fonctionnement inverse, qui est normalement fermé (NF) et ne s'ouvre que sous l'influence du champ magnétique ; ce n'est pas ce modèle qui est retenu pour notre projet.

Circuit interrupteur transistorisé

Comment allons-nous déclencher la sirène de l'alarme ? Rappelez-vous, nous disposons d'un ensemble d'interrupteurs normalement fermés et, lorsque l'un d'eux s'ouvre, l'alarme doit retentir.

Souvenez-vous du fonctionnement d'un transistor NPN. Quand sa base n'est pas suffisamment positive, il bloque le passage du courant entre le collecteur et l'émetteur. Quand la base devient suffisamment positive, le transistor permet le passage du courant.

Regardez le schéma de la figure 3-77, monté autour de notre transistor 2N2222 (NPN). Afin de tester son fonctionnement, j'ai inséré un interrupteur normalement fermé, simulant un capteur d'alarme. Vous ne disposez pas forcément d'un bouton-poussoir normalement fermé pour réaliser ce circuit ; utilisez simplement votre imagination, avant de passer à la réalisation sur une plaque de montage.

Tant que le contact du bouton-poussoir reste fermé, la base du transistor est reliée au pôle négatif de l'alimentation, par une résistance de 1K. La base est également reliée au pôle positif de l'alimentation par une résistance de 10K. En raison de la différence de potentiel entre les deux résistances, la tension de la base est plus proche de 0 V que de 9 V, ce qui maintient le transistor sous son niveau de conduction. En conséquence, le transistor ne laisse pas passer le courant et la LED ne reçoit pas assez de tension pour s'allumer.

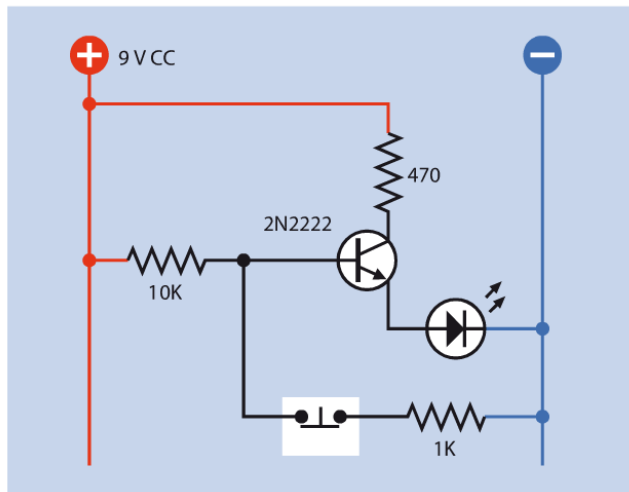


Figure 3-77. Circuit simple permettant l'allumage d'une LED quand un bouton-poussoir normalement fermé est ouvert.

Maintenant, que se passe-t-il quand le bouton-poussoir est enfoncé ?

La base du transistor perd sa liaison vers le pôle négatif de l'alimentation et n'est plus reliée qu'au pôle positif. Elle devient plus positive, ce qui conduit le transistor à réduire sa résistance apparente et à laisser passer un courant plus important. La LED s'allume. Ainsi, quand le bouton-poussoir coupe la connexion, la LED brille.

Cela me semble être un bon système. Plusieurs capteurs vont être nécessaires pour les différentes portes et fenêtres, mais c'est sans problème, car ils peuvent être reliés en série (figure 3-78), les capteurs d'alarme

remplacent alors le bouton-poussoir. Le câblage peut faire le tour de la maison, sa résistance restera faible, comparativement à la résistance de 10K.

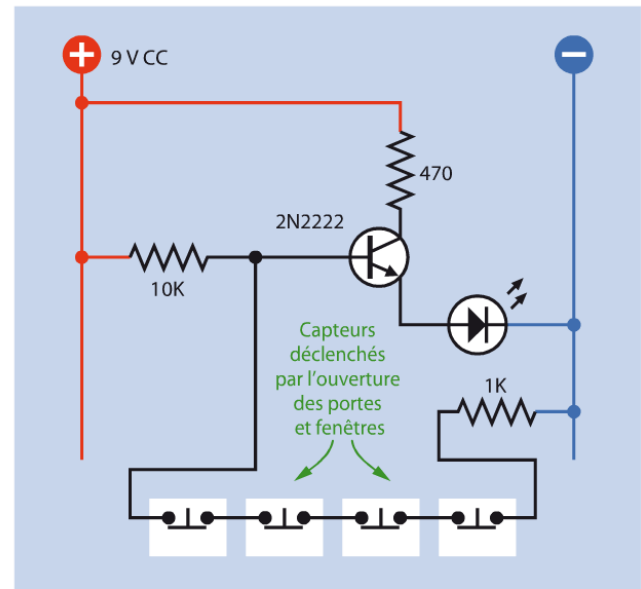


Figure 3-78. Dans un réseau de capteurs reliés en série, n'importe lequel pourra rompre la continuité et déclencher le transistor.

Lorsque les capteurs restent fermés, le transistor laisse passer un très faible courant, environ 1 mA. À titre de démonstration, le circuit peut fonctionner sur une pile de 9V. Pour un usage réel, mieux vaut l'alimenter avec une batterie rechargeable de 12 V entretenue par un chargeur automatique. Cela dépasse l'objectif de ce livre, toutefois, sachez que des batteries pour les systèmes d'alarme et les chargeurs se trouvent facilement, si vous le souhaitez.

Supposons maintenant que nous remplaçons la LED par un relais (figure 3-79). J'ai utilisé un relais bipolaire bien que, pour l'instant, nous n'ayons pas besoin du deuxième pôle. Tant que les capteurs restent fermés, la base du transistor est portée à une tension relativement basse et le transistor n'alimente pas la bobine du relais dont les contacts restent à la position indiquée.

Lorsque l'un des capteurs est ouvert, une tension plus élevée sur la base du transistor incite celui-ci à transmettre du courant à la bobine du relais, ce qui déclenche l'alarme (figure 3-80). Dans ce cas, vous pouvez utiliser un relais, car il ne sera pas activé en permanence. Il sera normalement au repos et ne consommera du courant que lorsque l'alarme se déclenchera. Remarquez que j'ai retiré la résistance de 470 Ω du circuit, car le relais ne nécessite pas de protection par rapport à l'alimentation.

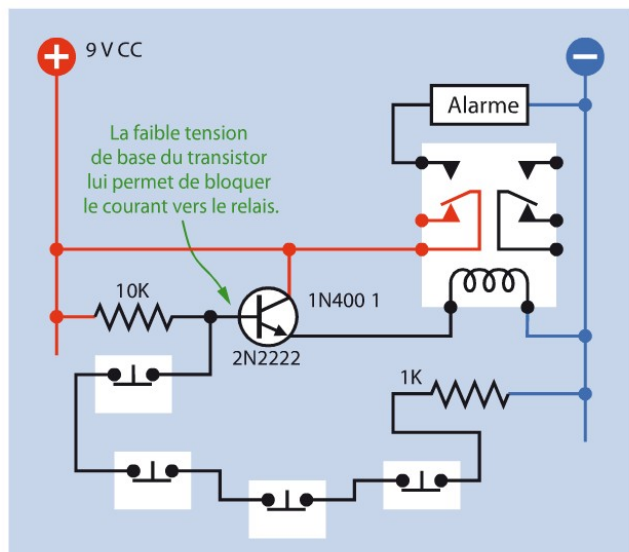


Figure 3-79. Dans ce circuit, le relais n'est activé que lorsqu'un interrupteur du réseau de capteurs est ouvert.

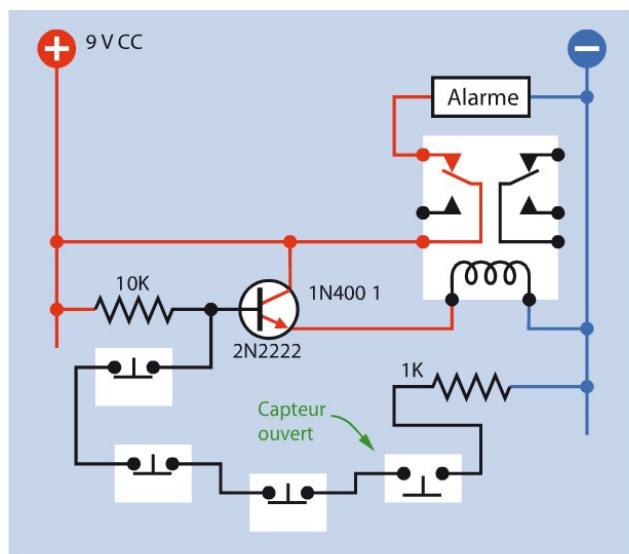


Figure 3-80. Un capteur du réseau est maintenant ouvert. Le relais est activé par le transistor.

Vous pouvez construire ce circuit vous-même, en utilisant le relais de l'expérience 7.

Deux questions se posent à ce stade :

- Le relais va-t-il surcharger le transistor ?
- Rappelez-vous qu'un transistor impose une petite chute de tension lorsqu'il est conducteur. La tension disponible sera-t-elle suffisante pour activer un relais 9 V ?

Notez que la fiche technique du relais vous indique la tension minimale pour entraîner la bobine et la tension maximale pour ne pas endommager le transistor.

Relais à verrouillage automatique

Le circuit ainsi monté active l'alarme si l'un des capteurs est ouvert. C'est parfait, mais que se passe-t-il si le contact du capteur est refermé rapidement ? La tension de base du transistor redevient faible et l'alarme repasse en veille et ne remplit pas son rôle.

Selon le 8^e point du cahier des charges, l'alarme doit se maintenir de manière autonome. Elle doit continuer à retentir, même si quelqu'un referme une issue juste après l'avoir ouverte. Le relais doit se verrouiller de lui-même d'une façon ou d'une autre.

On pourrait pour cela utiliser un *relais à verrouillage*, mais le problème est qu'il comporte deux bobines. Il faudrait donc un circuit additionnel pour le déverrouiller lorsqu'on veut stopper l'alarme. Il est beaucoup plus facile d'utiliser un relais conventionnel et de trouver un moyen de le maintenir activé indéfiniment après que sa bobine a été brièvement excitée.

Le secret se trouve sur la figure 3-81. Le bouton-poussoir le plus à droite vient d'être refermé juste après avoir été ouvert. Le transistor n'est donc plus conducteur, mais le relais reste activé grâce à un fil reliant un de ses contacts à la bobine. Quand le relais déclenche l'alarme, il s'auto-active également.

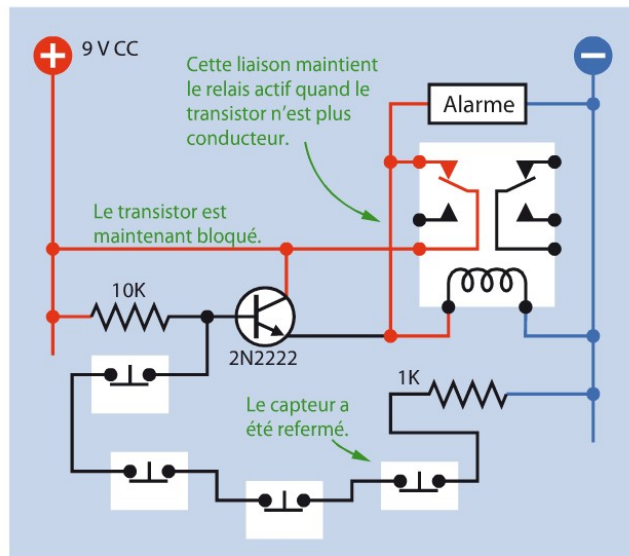


Figure 3-81. Le capteur vient d'être refermé. Le transistor est à nouveau bloqué, mais l'alarme reste activée.

La figure 3-82 clarifie ce processus en rendant visible le chemin emprunté par le courant. Tant que les contacts du relais sont fermés, sa bobine est activée par ses propres contacts. De cette façon le relais reste actif.

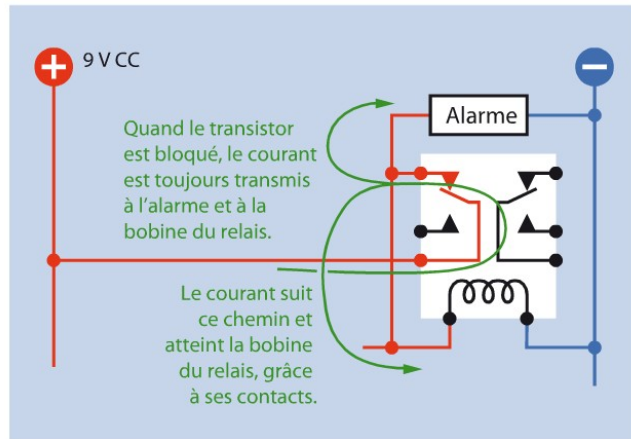


Figure 3-82. Vue agrandie du schéma précédent montrant la façon dont le relais reste activé.

Élimination des tensions néfastes

Tout cela semble prometteur, mais un problème subsiste. La figure 3-81 n'est pas tout à fait correcte. En haut de la figure 3-83, vous pouvez observer une vue rapprochée de la partie du circuit concernée. L'alarme s'est auto-verrouillée et le transistor est maintenant bloqué, le courant partant de la bobine retourne à l'émetteur du transistor.

Appliquer une tension inverse à un transistor n'est pas recommandé, car il risquerait d'être endommagé. La solution consiste à utiliser un élément qui bloque ce courant inverse : une diode (bas de la figure 3-83).

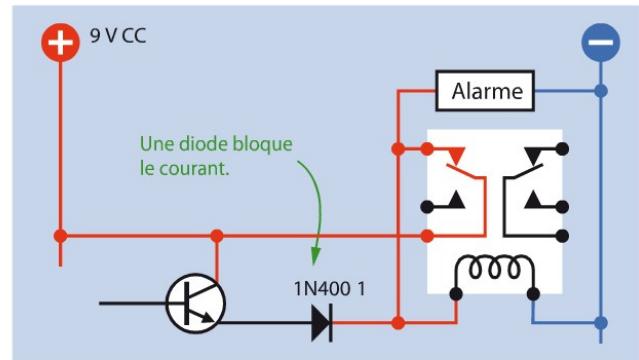
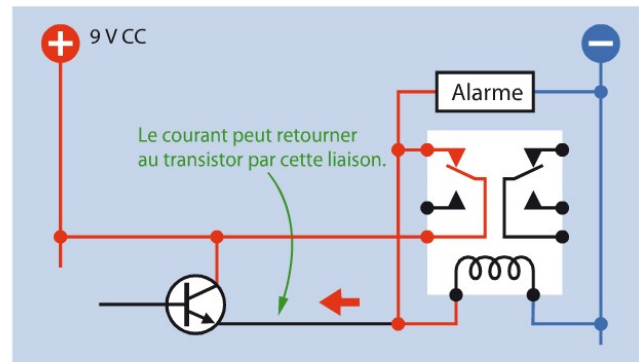


Figure 3-83. Une diode est ajoutée afin d'empêcher le courant de revenir vers le transistor quand l'alarme s'est auto-verrouillée et que le transistor est bloqué.

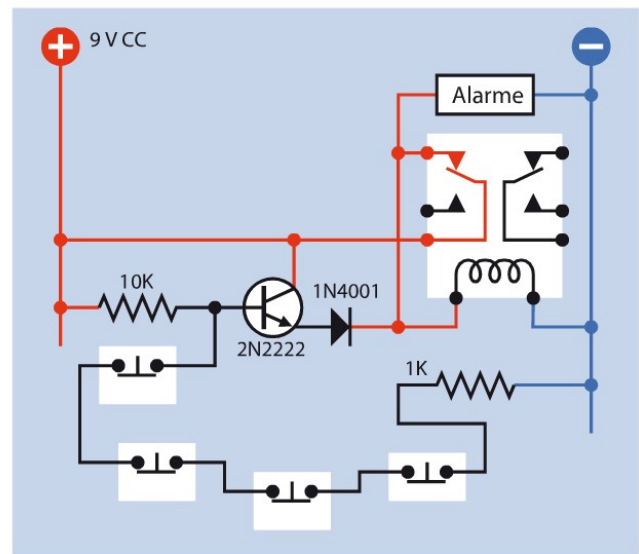


Figure 3-84. Le circuit complet, incluant maintenant une diode.

Fondamentaux : tout sur les diodes

Une diode est un type très simple de semi-conducteur. Elle autorise l'électricité à circuler dans une direction et la bloque dans la direction inverse. Comme sa cousine bien plus récente, la LED, une diode peut être endommagée si l'on inverse la tension ou quand on lui impose une puissance excessive, mais la plupart des diodes ont généralement une tolérance bien supérieure à celle des LED.

L'extrémité de la diode qui bloque la tension positive est toujours identifiée, généralement par une bande circulaire (figure 3-25). L'extrémité qui est marquée s'appelle la *cathode*. L'autre extrémité, appelée l'*anode*, ne comporte aucun marquage. Les diodes sont particulièrement utiles dans les circuits logiques et peuvent aussi convertir le courant alternatif (CA), en courant continu (CC). Si une diode n'est pas assez résistante pour supporter le courant que vous souhaitez bloquer, il suffit d'utiliser une diode plus robuste. Ces composants sont disponibles pour des courants très variés.

Il est conseillé d'employer les diodes en dessous de leur capacité nominale. Comme tout semi-conducteur, elles peuvent surchauffer et brûler en cas d'utilisation inappropriée.

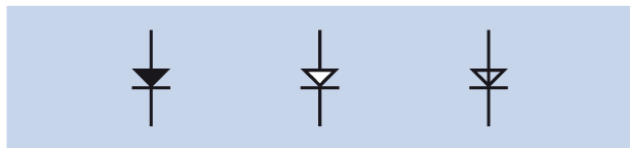


Figure 3-85. Trois variantes du symbole d'une diode. Il ressemble à celui d'une LED, sans le cercle ni la flèche. Ils sont fonctionnellement identiques.

Un problème en soulève un autre

Dans ce qui précède, nous avons permis au relais de se maintenir actif de manière autonome. Pour cela, une connexion a été ajoutée, mais un nouveau problème est alors survenu : le courant qui retourne vers le transistor. L'ajout d'une diode a réglé ce problème, mais en a engendré un autre.

L'effet cumulé de la diode et du transistor entraîne une chute de tension en échange de leur action, car ce sont des semi-conducteurs.

Quand le relais est au repos, le courant doit l'activer en passant par le transistor, puis par la diode. Une fois le relais activé, il se maintient tout seul ce qui n'est plus un problème. Le transistor impose une chute de tension

d'environ 0,7 V, tout comme la diode, soit au total 1,4 V. Quelle que soit la tension d'alimentation, cette chute de tension ne varie pas.

Un relais de 9V fonctionne correctement avec une tension de 7,6 V. La fiche technique de mon relais Omron indique que la série G5V-2 nécessite une tension égale à 75 % de la tension d'alimentation, soit environ 6,75 V. Nous avons donc une marge d'erreur acceptable.

En revanche, qu'advient-il si vous utilisez un relais différent ? Certains ont des tolérances plus réduites que d'autres. Il en va de même si vous utilisez une pile pour alimenter le circuit et si sa tension chute en dessous de 9V. Un concepteur doit toujours prévoir l'inattendu, c'est un principe général, et il doit utiliser les composants en respectant le plus possible leurs caractéristiques nominales.

Quelques lecteurs de la première édition de cet ouvrage m'ont fait part du problème survenant lorsque la tension d'alimentation chutait. Je recommandais alors une alimentation de 12 V CC, et je pensais que la chute de tension de 1,4 V imposée par le transistor et la diode serait acceptable. Mais dans cette nouvelle édition, toutes les expériences fonctionnent avec une alimentation de 9 V CC. Cette fois, une chute de tension de 1,4 V par rapport à 9 V n'est plus acceptable.

Vous voyez les conséquences résultant d'une décision. Maintenant que j'utilise une alimentation de 9 V CC, je dois réfléchir à une autre façon de verrouiller automatiquement le relais.

Réolvons le problème

La première étape de la résolution d'un problème consiste à bien comprendre ce qui se passe.

Le contrôle de l'alarme est confié à deux composants : le transistor et le relais. Le transistor déclenche l'alarme. Après quoi, il se bloque et le relais doit assurer lui-même son verrouillage. Mais ce principe comporte une faiblesse : ces deux éléments peuvent interférer l'un avec l'autre. Une meilleure approche consisterait à utiliser un seul élément pour remplir cette fonction. Le transistor resterait dans son rôle de contrôle du relais, tout en maintenant sa fonction de conducteur.

Voyons comment procéder. Tout ce dont j'ai besoin, c'est d'utiliser le second pôle du relais, fermé au repos, pour relier la chaîne des capteurs à la masse (figure 3-86).

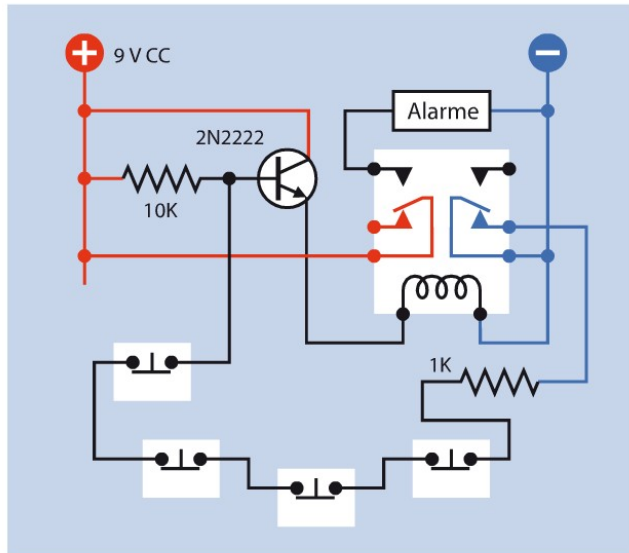


Figure 3-86. Le réseau des capteurs est maintenant relié à la masse par le contact de droite du relais qui est fermé au repos.

Voici comment cela fonctionne :

- La base du transistor est maintenant reliée au pôle négatif de l'alimentation par les capteurs et de la résistance de 1K, en passant par le contact du relais – normalement fermé. Tant que cette chaîne n'est pas interrompue, la base du transistor est à un niveau suffisamment bas pour que le transistor bloque le passage du courant.
- Si l'on ouvre un capteur, la base du transistor n'est plus ramenée à la masse. Le transistor active le relais qui ferme le contact de gauche et déclenche l'alarme, tout en ouvrant le contact de droite.
- Et si l'on referme le capteur, cela reste sans effet, car le contact de droite du relais est ouvert et provoque la rupture de la liaison vers la masse de la chaîne des capteurs. Le transistor continue à laisser passer le courant et le relais reste activé (figure 3-87).

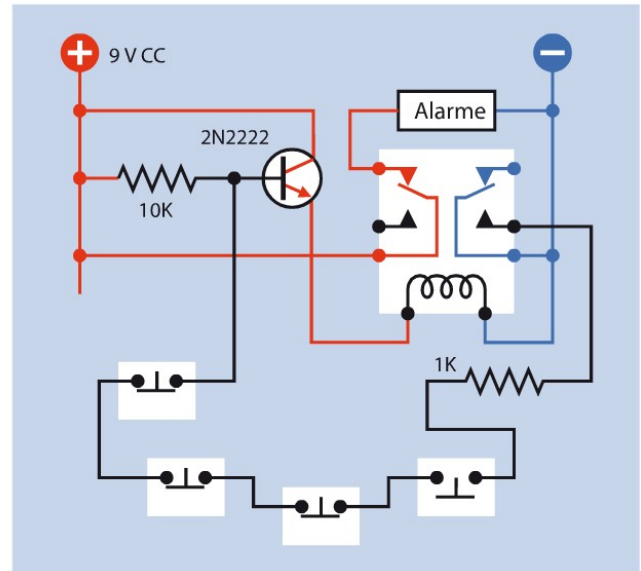


Figure 3-87. Un capteur vient d'être ouvert. Le transistor reste activé, même si le capteur est refermé.

Le problème est maintenant résolu.

Diode de protection

Comme vous l'avez constaté, j'ai éliminé la diode du circuit. Pourtant, si vous observez la figure 3-88 (je vous promets que c'est la dernière version, au moins pour l'instant), vous verrez que la diode a refait son apparition, dans un rôle différent. À quoi sert-elle dorénavant ?

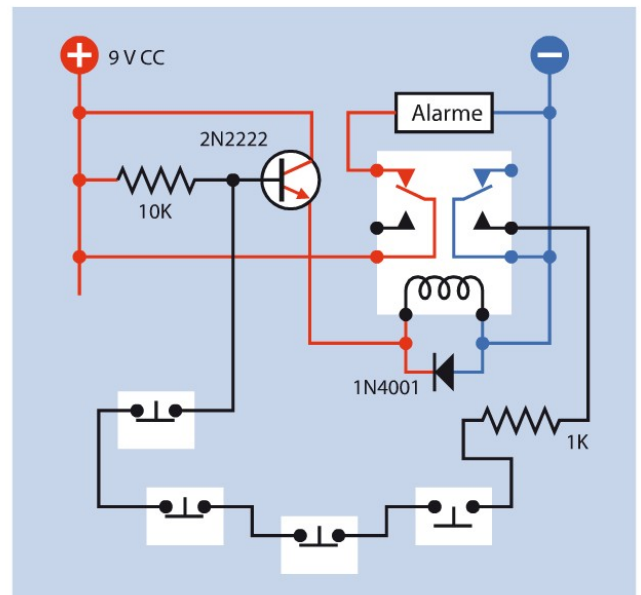


Figure 3-88. La diode est réapparue. Elle assure une protection.

Plus tard dans ce livre, nous reviendrons sur les bobines. Pour le moment, vous pouvez retenir qu'une bobine de fil stocke de l'énergie quand on lui applique une tension et qu'elle la libère quand on retire cette tension. L'énergie libérée provoque un pic de courant qui peut endommager certains composants, en particulier les transistors.

Il est, de ce fait, habituel d'ajouter une *diode de protection* aux bornes du relais. La diode est orientée de façon à bloquer le courant dans le sens normal, le laissant passer dans la bobine, comme nous le souhaitons. Quand le courant est interrompu, la bobine essaie de libérer son énergie ; la diode se comporte alors comme une résistance très faible vis-à-vis du relais, lui permettant de court-circuiter la bobine au lieu de la laisser détruire les autres composants.

Et c'est précisément ce qui arrive. Si vous utilisez un petit relais muni d'une bobine qui n'absorbe qu'un faible courant, vous pouvez vous dispenser d'utiliser une diode de protection. C'est toutefois une bonne pratique et vous devriez prendre l'habitude d'en prévoir une.

Réalisation du circuit

Il est important que je vous fournisse un maximum d'explications pour vous montrer comment on développe un circuit à partir de rien.

La figure 3-89 montre le plan de la plaque de montage. Pour le moment, à titre de démonstration, j'ai utilisé une LED, au lieu des avertisseurs sonores qui seront réintégrés par la suite.

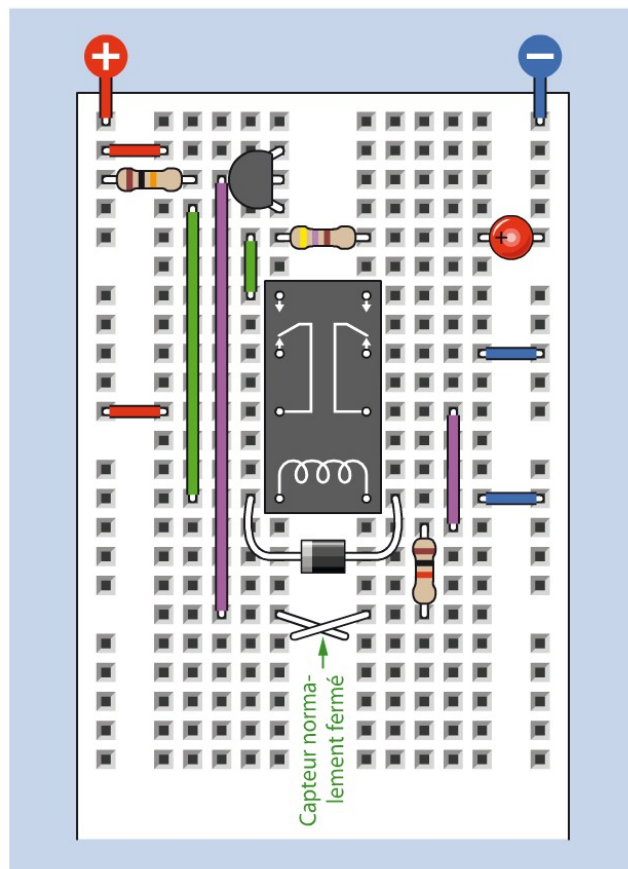


Figure 3-89. Version finale du circuit d'alarme sur une plaque de montage.

La figure 3-90 est une vue en transparence du circuit.

Afin de simuler les capteurs d'alarme sur la platine de montage, j'aurais pu utiliser un bouton-poussoir normalement fermé. Cependant, je voulais réduire le prix des composants et, si vous souhaitez utiliser ce système d'alarme, vous devrez utiliser des capteurs magnétiques et non des boutons-poussoir. C'est la raison pour laquelle j'ai utilisé deux morceaux de fils dénudés, parfaits pour les tests, ils sont appelés « fils capteurs ». Vous pouvez les voir, formant une croix, sous le relais.

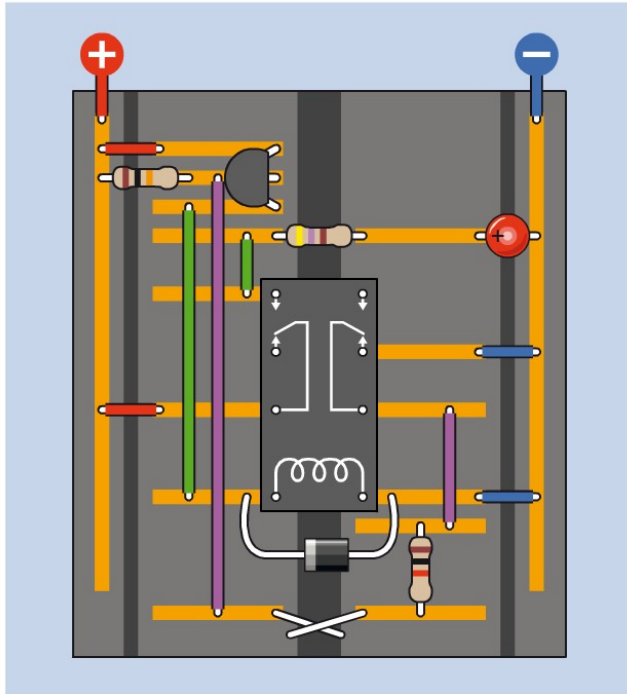


Figure 3-90. Vue en transparence de la plaque de montage du circuit.

Assurez-vous que les deux fils se touchent quand vous mettez le circuit sous tension. Rien ne devrait se passer.

Écartez les fils capteurs. La LED s'allume et, si vous réalisez la version suivante de ce circuit, vous entendez un bruit retentissant, indiquant que l'alarme a été déclenchée.

Reconnectez les fils capteurs, simulant la situation où un intrus a ouvert une fenêtre, entendu l'alarme, puis rapidement refermé la fenêtre. Si votre circuit est correctement réalisé, la LED doit rester allumée.

Nous avons donc un circuit fonctionnel, l'alarme se verrouille bien toute seule.

Mais comment pouvons-nous l'arrêter ?

Il vous suffit de déconnecter l'alimentation. Le relais retournera à sa position de repos et, la prochaine fois que vous mettrez l'alarme sous tension, elle reviendra à nouveau en mode veille. Dans la version définitive de ce projet, vous devrez entrer un code secret sur un clavier pour stopper l'alarme. Dans l'expérience 21, nous étudierons comment créer un système protégé par un code. Cela implique l'utilisation de circuits intégrés logiques, dont nous n'avons pas encore parlé.

Ajout du bruit

Pour l'avertisseur sonore de l'alarme, vous pourriez utiliser le circuit oscillateur et le haut-parleur de l'expérience 11. Il existe toutefois une meilleure approche. Un petit circuit intégré bien connu, le temporisateur 555 conviendra bien mieux. Cela fera l'objet de l'expérience 16.

Le temporisateur 555 peut également remplir les besoins 7 et 9 du cahier des charges, stipulant qu'un délai doit être ménagé lors de la mise en veille de l'alarme. Je vais néanmoins mettre en suspens le projet de l'alarme jusqu'à l'expérience 18, où nous le terminerons.

Récapitulatif

- On peut utiliser un transistor pour provoquer une action nécessitant un courant élevé à partir d'une entrée de faible niveau, et vice versa.
- On peut câbler un relais pour qu'il se verrouille tout seul en réinjectant du courant dans sa bobine.
- Une diode peut bloquer le passage du courant vers un point où il ne doit pas circuler.
- Quand un courant traverse une diode dans le sens direct, la tension chute d'environ 0,7 V.
- Un transistor réduit également la tension qu'il transmet d'environ 0,7 V.
- La chute de tension imposée par un semi-conducteur est identique, quelle que soit la tension d'alimentation. Par conséquent, cette chute de tension est plus significative si la tension d'alimentation est faible.
- La bobine d'un relais peut créer un champ électromagnétique inverse (un pic de courant inverse) quand on supprime son alimentation.
- Une diode de protection connectée en parallèle avec la bobine d'un relais permet d'éliminer l'effet du champ électromagnétique inverse. La diode doit être orientée afin de bloquer le courant normal d'excitation de la bobine et absorber le courant inverse qu'elle génère.

Circuits intégrés

4

Avant d'entrer dans le monde fascinant des circuits intégrés (appelés aussi CI ou puces, *chips* en anglais), il faut que je vous fasse une petite confession. Certaines expériences du chapitre 3 auraient pu être réalisées plus simplement si nous avions utilisé des circuits intégrés.

Cela signifie-t-il alors que vous avez perdu votre temps ? Que nenni ! Je suis intimement persuadé que la meilleure manière de comprendre les principes de l'électronique est de monter des circuits à partir de composants élémentaires (résistances, diodes, transistors...). Mais sachez que les circuits intégrés, avec leurs dizaines, centaines ou milliers de transistors, vont vous aider grandement dans la réalisation de vos montages.

Je suis sûr que vous allez devenir accro aux circuits intégrés ! Bon, peut-être pas autant quand même que le robot de la figure 4-1...

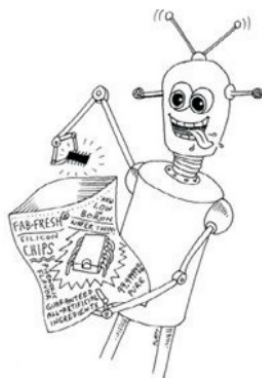


Figure 4-1. À la découverte des circuits intégrés !

Matériel du chapitre 4

Le seul nouvel outil que je vous recommande pour travailler avec les circuits intégrés est une sonde logique. Elle indique si telle ou telle broche d'un circuit présente une tension basse ou haute, ce qui peut être utile pour connaître la fonction du circuit. Une sonde possède une fonction mémoire dotée d'une LED, qui s'allume et reste allumée en réponse à une impulsion trop rapide pour être décelable à l'œil nu.

Achetez la sonde la moins chère possible, sans préférence de marque.

Composants

Pour acheter vos composants et fournitures, reportez-vous chapitre 6.

Fondamentaux : choisir un circuit intégré

La figure 4-2 représente deux circuits intégrés. Celui en haut de la figure est un modèle ancien à *broches traversantes* espacées de 2,54 mm (1/10 de pouce) qui se logent dans les trous de votre plaque d'essais perforée. Ces types de circuits intégrés sont les seuls que j'utiliserai car ils sont plus faciles à manipuler. Le circuit le plus petit est du type *Composant monté en surface (CMS)* que je n'utiliserai pas car il ne peut pas être installé sur une plaque d'essais ou une platine perforée. Il est, de plus, difficile à manipuler.

Pour la plupart, les composants traversants et montés en surface fonctionnent de manière identique, leur seule différence étant leurs dimensions, bien que certains composants montés en surface utilisent des tensions d'alimentation plus faibles.

Le boîtier des circuits intégrés est habituellement en plastique ou en résine ; on parle souvent de *package*. Les circuits traditionnels sont en général vendus en boîtier à double rangée de broches (*dual-inline package*, abrégé DIP, ou PDIP lorsqu'il est en plastique).



Figure 4-2. Un circuit intégré traversant (en haut) et un composant monté en surface (en bas).

Les composants montés en surface sont le plus souvent identifiés par un acronyme commençant par S, par exemple SOIC, pour *small outline integrated circuit* – circuit intégré de petite dimension. De nombreuses variantes de circuits montés en surface existent, l'espacement entre les broches par exemple n'est pas fixe. Si vous achetez vous-même vos composants, soyez attentifs à choisir le bon modèle.

À l'intérieur du boîtier, le circuit est gravé sur une minuscule puce de silicium ; c'est de là que vient le mot *chip* (puce), utilisé depuis pour identifier les composants. En France, nous utilisons également le mot puce ou puce électronique pour désigner un circuit intégré. Des fils minuscules situés à l'intérieur du boîtier relient le circuit aux rangées de broches sortant de part et d'autre.

Le composant PDIP (figure 4-2) possède deux rangées de sept broches, soit 14 en tout. D'autres composants peuvent comporter 4, 6, 8, 16 ou davantage de broches.

Quasiment tous les circuits comportent un numéro de référence. Vous noterez que, même si les circuits de la figure 4-2 semblent assez différents, ils ont tous deux « 74 » dans leur référence. C'est parce qu'ils appartiennent à la même famille de circuits logiques, dont les identifications commençaient à l'origine à partir de 7400 (7401,

7402, 7403, etc.). Ces circuits sont apparus il y a plusieurs décennies. Ils sont souvent identifiés comme famille 74xx. Je vais les utiliser fréquemment.

Regardez attentivement la figure 4-3. Les premières lettres identifient le fabricant ; vous pouvez les ignorer car c'est sans objet en ce qui nous concerne (SN identifie Texas Instruments, car ce fabricant appelait ses composants *Semiconductor Networks* au début de leur production).

Ignorez les premières lettres jusqu'au nombre 74. Il y a ensuite des lettres qui sont importantes. La famille 7400 a évolué au cours du temps et les lettres présentes après le nombre 74 identifient la série du circuit. Les principales séries apparues sont 74L, 74LS, 74C et 74HC. Il en existe encore d'autres.

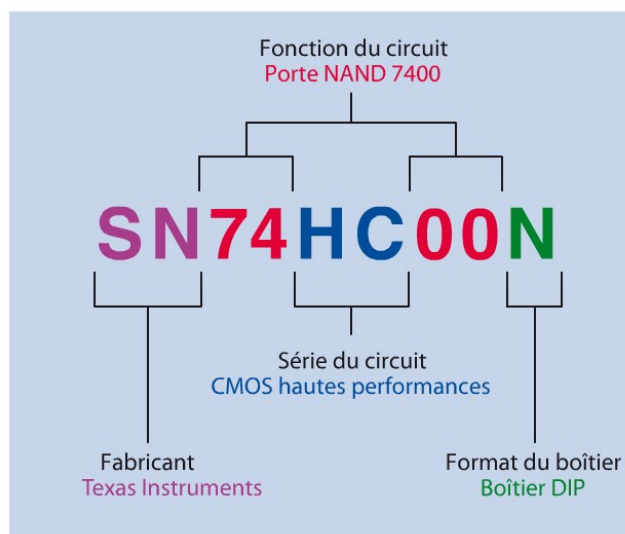


Figure 4-3. Identification d'un circuit intégré de la famille 74xx.

D'une façon générale, les séries les plus récentes sont plus rapides et plus universelles que les premières générations. Dans ce livre, je vais utiliser exclusivement la série HC de la famille 74xx car ces circuits sont disponibles à un coût modéré et utilisent peu d'énergie. D'autres séries plus récentes sont plus rapides, mais c'est sans importance – vous pouvez cependant utiliser la série HCT si vous préférez.

Après les lettres identifiant la série, vous trouvez une séquence de deux à cinq chiffres, qui identifient la fonction du composant. Puis viennent une ou plusieurs lettres. Il est inutile de vous en préoccuper.

Sur la figure 4-2, le circuit intégré de type DIP dont la référence est M74HC00B1 vous informe que c'est un composant de la famille 74xx, fabriqué par STMicroelectronics, de la série HC et dont la fonction est identifiée par les chiffres 00.

Le but de ces explications est de vous apprendre à interpréter les listes de composants des catalogues des fournisseurs lorsque vous achèterez vos circuits. Vous pourrez ainsi chercher « 74HC00 » chez un revendeur qui devrait vous proposer les composants de plusieurs fabricants.

Prenez simplement la précaution de vous assurer qu'ils pourront s'insérer dans votre plaque d'essais. Limitez pour cela votre recherche aux types DIP ou PDIP ou à broches traversantes. Si la référence commence par SS, SO ou TSS, il s'agit alors de composants montés en surface que vous ne devez pas utiliser.

La liste de tous les circuits intégrés nécessaires aux expériences de ce chapitre est consultable figure 6-7.

Optionnel : supports de circuits intégrés

Il est déconseillé de souder directement vos circuits intégrés car, en cas d'erreur de câblage ou si vous détruisez accidentellement un circuit intégré, vous devrez en dessouder toutes les broches avant de l'extraire. Afin d'éviter ce type de problème, procurez-vous des supports de circuits DIP (figure 4-4) et soudez-les directement sur votre plaque, puis enfichez vos circuits intégrés dans ces supports. Vous pouvez utiliser les moins coûteux (vous n'avez pas besoin de modèles à contacts plaqués or ici). Au minimum 5 supports à 8, 14 et 16 broches seront utilisés.



Figure 4-4. Vous pouvez insérer vos circuits intégrés dans des supports soudés sur votre plaque afin de ne pas les endommager en les dessoudant directement.

Essentiel : interrupteur à glissière

Un *interrupteur à glissière* possède un petit levier de commande que vous manipulez du bout du doigt, établissant ou interrompant un contact électrique présent à l'intérieur (figure 4-5).

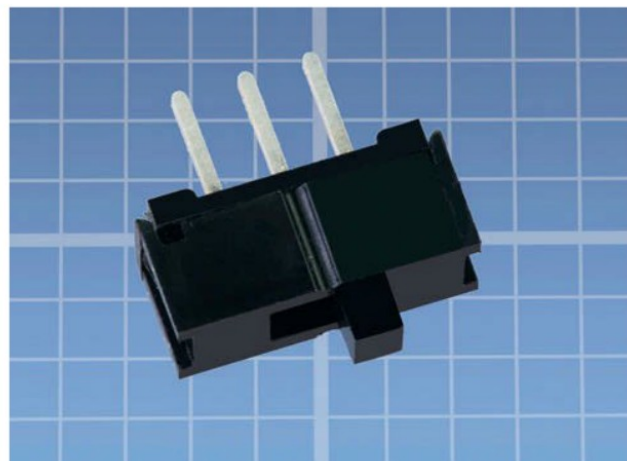


Figure 4-5. Interrupteur à glissière miniature à trois broches.



Surcharge des contacts

Un interrupteur à glissière miniature ne peut interrompre que des tensions et intensités limitées. C'est un composant prévu pour des circuits de faible puissance. Ses limites peuvent être de l'ordre de 100 mA sous 12 V CC. C'est suffisant dans notre cas. Vérifiez sur la fiche technique du fabricant si vous avez besoin d'un interrupteur capable de supporter des puissances plus importantes.

Essentiel : LED basse puissance

Les circuits logiques de la série HC que vous allez utiliser ne sont pas conçus pour fournir une puissance significative. Ils peuvent fournir jusqu'à 20 mA pour piloter une LED mais cela abaissera leur tension de sortie, la rendant inutilisable en entrée d'un autre composant. C'est pourquoi, je vous suggère d'utiliser des LED basse puissance pour toutes les expériences mettant en jeu des circuits intégrés.

Rappelez-vous qu'avec les LED à faible consommation, vous devez ajouter une résistance placée en série, de valeur plus importante, puisqu'elles ne tolèrent pas une intensité aussi élevée que les LED génériques.

Essentiel : afficheurs numériques à LED

Dans l'un des projets utilisant des circuits intégrés, la sortie sera affichée à l'aide d'un afficheur à sept segments comme vous en trouvez sur les réveils numériques ou les fours à micro-ondes (figure 4-6).

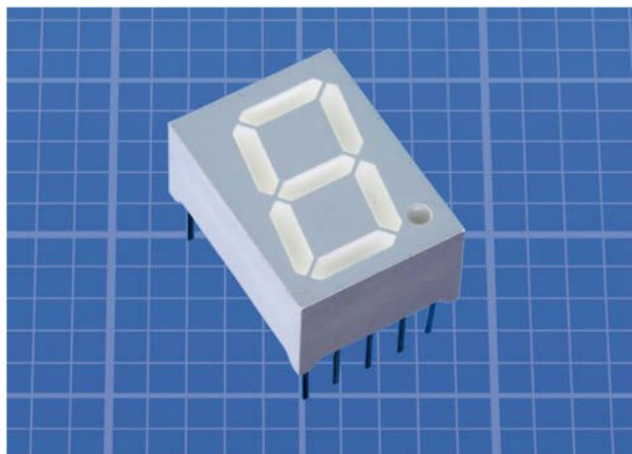


Figure 4-6. L'afficheur à sept segments est le plus économique des composants permettant d'afficher un chiffre. Il peut être directement piloté par la sortie d'un circuit intégré CMOS.

Essentiel : régulateur de tension

Comme nombre de circuits logiques nécessitent un courant continu de 5 V CC, vous aurez besoin d'un régulateur de tension. Le modèle LM7805 convient parfaitement. La référence du circuit sera précédée ou suivie d'une abréviation identifiant le fabricant et le style du boîtier, comme dans la référence LM7805CT de Fairchild. Peu importe le fabricant, mais le boîtier doit ressembler à celui de la figure 4-7 (de type TO220). Vous en aurez besoin dans chaque circuit logique, soit 5 pièces au total.

Composants optionnels supplémentaires

Afin de finaliser le système d'alarme décrit dans l'expérience 18, vous aurez besoin de capteurs magnétiques se posant sur les portes ou les fenêtres, comme le modèle 8601 de Directed, ou un modèle équivalent.

Si vous souhaitez passer d'un montage sur plaque d'essais à une version définitive dans son propre boîtier, les interrupteurs tactiles ne seront pas suffisamment robustes ni faciles à manipuler. Pour l'expérience 18, vous aurez besoin d'un bouton poussoir DPDT de taille normale.

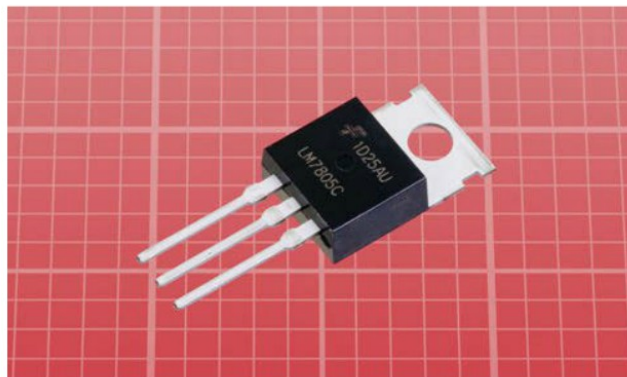


Figure 4-7. De nombreux circuits intégrés nécessitent une tension stabilisée de 5 V qui peut être fournie par ce régulateur à partir d'une tension de 7,5 ou 12 volts.

Historique : naissance des circuits intégrés

Le savant britannique Geoffrey W.A. Dummer est le premier à avoir eu l'idée d'intégrer des composants à semi-conducteurs dans un même boîtier ; après en avoir parlé pendant des années, il tente sans succès d'en construire un en 1956. Ce n'est que deux ans plus tard que Jack Kilby, employé chez Texas Instruments, conçoit le premier circuit intégré. Sa version utilise du germanium, déjà utilisé comme semi-conducteur (une diode au germanium intervient dans le projet de radio à détection par diode cristal de l'expérience 31). Cependant, Robert Noyce (figure 4-8) eut une meilleure idée.



Figure 4-8. Portrait de Robert Noyce, qui a breveté le circuit intégré et cofondé la société Intel.

Né dans l'Iowa en 1927, il déménage dans les années 1950 pour travailler avec William Shockley, en Californie. Ce dernier vient de fonder une entreprise de fabrication de transistors, dont il a été co-inventeur durant son passage aux laboratoires Bell.

Noyce est l'un des huit employés déçus par le management de Shockley, qu'il quitte pour créer la société Fairchild Semiconductor. Il y invente un circuit à base de silicium qui évite les problèmes de fabrication liés au germanium. C'est pourquoi Robert Noyce est généralement considéré comme l'homme qui a rendu possible les circuits intégrés.

Les premières applications sont d'ordre militaire, par exemple le système de guidage des missiles Minuteman nécessitant des composants petits et légers. Presque tous les circuits fabriqués entre 1960 et 1963 sont destinés à cette fin. Le prix d'un circuit passe alors d'environ 1 000 à 25 \$, en dollars de l'époque.

À la fin des années 1960, les circuits intégrés à moyenne échelle apparaissent, chacun contenant des centaines de transistors. L'intégration à grande échelle permet de loger des dizaines de milliers de transistors sur un seul circuit au milieu des années 1970 et, aujourd'hui, les circuits peuvent contenir jusqu'à plusieurs milliards de transistors.

Robert Noyce a également fondé la société Intel en collaboration avec Gordon Moore, mais il meurt prématurément d'une crise cardiaque en 1990. Pour en savoir plus sur l'histoire des circuits intégrés, de leur conception et de leur fabrication, consultez le site de la Silicon Valley Historical Association (www.siliconvalleyhistorical.org).

Expérience 16 : émission d'une impulsion

Je vais vous présenter le meilleur circuit intégré jamais conçu : le temporisateur 555.

1. Ce temporisateur (*timer*) est **incontournable** et vous devez absolument le connaître. Certaines sources estiment qu'on en fabrique plus d'un milliard d'exemplaires par an. Il sera utilisé d'une façon ou d'une autre dans la plupart des circuits à venir de ce livre.
2. Il est très **utile**. Le 555 est probablement le circuit intégré le plus universel qui existe et ses applications sont innombrables. Sa sortie pouvant délivrer jusqu'à 200 mA le rend très utile et difficile à endommager.

3. Il est assez **mal connu**. Après avoir lu tous les manuels que j'ai pu trouver consacrés au temporisateur 555, son fonctionnement interne est rarement expliqué de façon claire. Vous en aurez ici une présentation graphique, pour que vous soyez en mesure d'en faire une utilisation créative.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 résistance de 470 Ω et 3 de 10K
- 1 condensateur de 0,01 μF et 1 de 15 μF
- 1 potentiomètre ajustable de 20 ou 25K et 1 de 500K
- 1 circuit intégré temporisateur 555
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 LED générique

Caractéristiques de ce circuit intégré

Les broches d'un temporisateur 555 sont numérotées dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (en vue de dessus), comme sur la figure 4-9. Son boîtier possède une encoche ou un simple point permettant d'identifier sa partie haute. L'écartement entre les broches est de 2,54 mm (1/10 de pouce).

Tous les autres circuits intégrés traversants ont les mêmes caractéristiques, mais ils peuvent posséder davantage de broches. Habituellement, mais ce n'est pas toujours le cas, l'espace horizontal entre les deux rangées de broches est de 7,62 mm (3/10 pouce), ce qui permet à ces composants de s'insérer aisément au-dessus de la séparation médiane des plaques d'essai, vous donnant accès à chaque broche du circuit. C'est la raison pour laquelle une platine d'essai est conçue de cette manière.

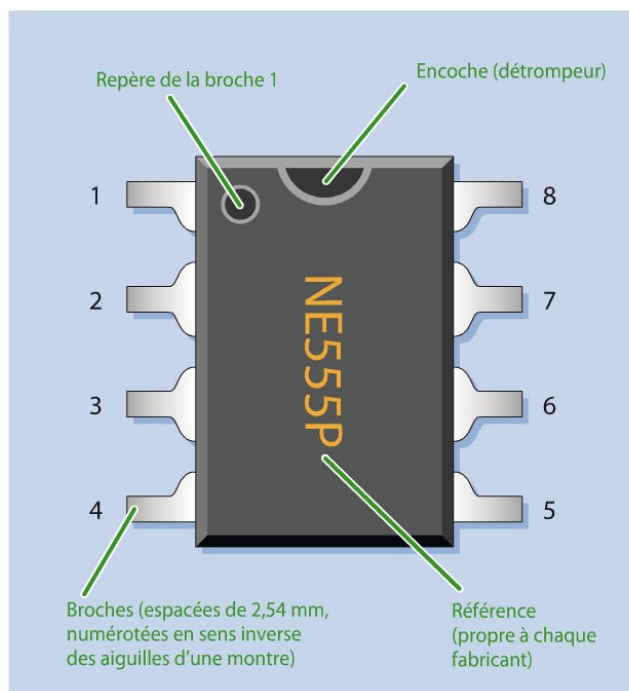


Figure 4-9. Vue de dessus du boîtier d'un circuit intégré à huit broches. Alors que la plupart des circuits intégrés possèdent une encoche semi-circulaire en haut, ils ne sont pas tous munis du point identifiant la broche 1.

Test du multivibrateur (monostable)

Les broches du temporisateur 555 sont identifiées par un label (figure 4-10). Ce plan vous indique le brochage du circuit. La fonction de chaque broche sera détaillée par la suite.

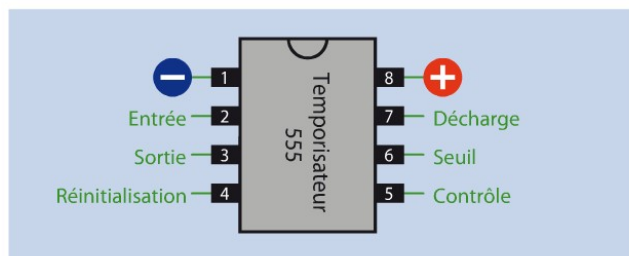


Figure 4-10. Brochage du temporisateur 555

Le schéma du circuit de test d'un temporisateur est représenté sur la figure 4-11.

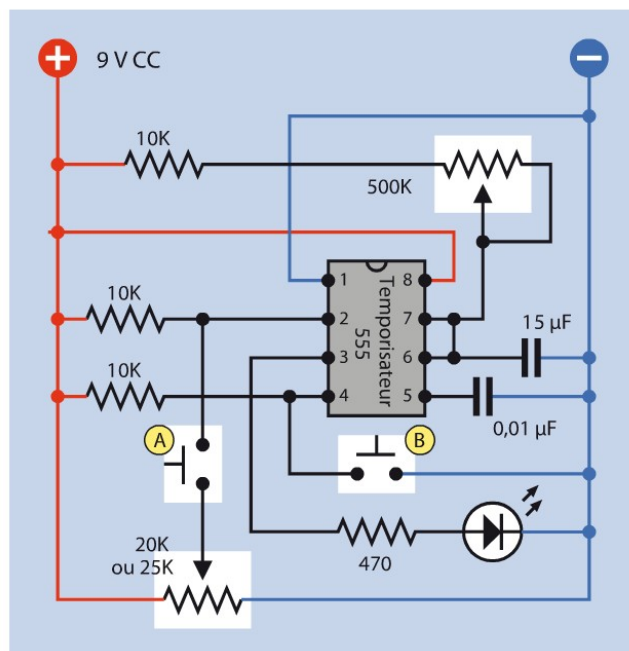


Figure 4-11. Représentation schématique du circuit de test du temporisateur 555.

Vous pouvez réaliser ce circuit sur une plaque de montage, selon le plan de la figure 4-12. Vous remarquerez, en bas à gauche, un fil de pontage rouge reliant la section du bus d'alimentation positive au-dessus à celle qui se trouve immédiatement en dessous. Ce pontage est nécessaire si votre platine d'essai comporte un bus dans une section non interconnectées.

La valeur des composants est indiquée sur la figure 4-13. Pour mieux visualiser les interconnexions, la figure 4-14 est une vue en transparence du circuit.

Mettez sous tension : rien ne se passe car le temporisateur attend un ordre de départ. Préréglez le montage en plaçant le potentiomètre de 500K à mi-course.

Tournez maintenant le potentiomètre de 20K dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et appuyez sur le bouton-poussoir A. Si rien ne se passe, tournez le potentiomètre de 20K dans le sens des aiguilles d'une montre et réessayez. Une de ces positions devrait générer une impulsion visible sur la LED, dépendante de la façon dont vous avez relié votre potentiomètre ajustable. Si vous n'obtenez toujours rien, c'est qu'il y a une erreur dans votre circuit.

Sur le schéma, vous constaterez que la broche 2 du temporisateur – la broche de déclenchement (*trigger*) – est reliée, à travers une résistance de 10K, au pôle positif de l'alimentation. Un fil de liaison violet est également connecté à cette broche, ainsi qu'au potentiomètre ajustable par l'intermédiaire d'un interrupteur tactile. Si le curseur du potentiomètre est réglé pour être relié directement à la masse (pôle négatif de l'alimentation), l'interrupteur tactile forcera la broche 2 au niveau bas. Cela provoquera le déclenchement du temporisateur.

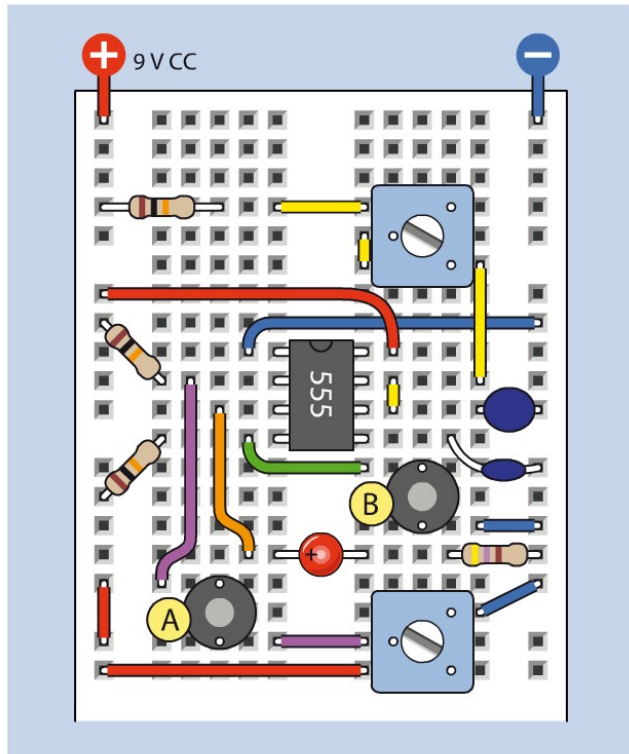


Figure 4-12. Réalisation sur plaque d'essai du circuit de test du temporisateur.

Si le potentiomètre de 20K est tourné à fond dans l'autre sens, le bouton-poussoir A appliquera directement une tension positive à la broche 2 qui est déjà à un niveau positif ; cela ne provoquera aucun effet.

- Une tension positive sur la broche de déclenchement est ignorée par le circuit intégré.
- Une diminution de la tension appliquée à la broche 2 déclenche le fonctionnement du circuit.

Toutefois, il convient de définir ce qu'est un niveau positif et de combien ce niveau doit chuter pour provoquer un déclenchement.

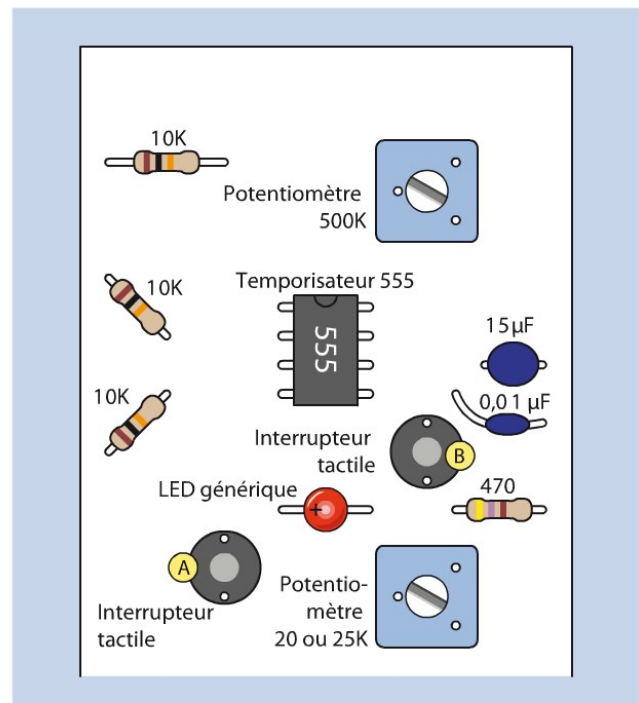


Figure 4-13. Valeurs des composants du circuit de test du temporisateur.

Prenez votre multimètre et réglez-le pour les tensions continues, puis mesurez la tension entre la broche 2 et la masse de l'alimentation en tournant le potentiomètre de 20K sur différentes positions et appuyez sur le bouton-poussoir A. Lorsque vous appuyez sur le bouton, si une tension inférieure à 3 V est appliquée à la broche 2, le temporisateur allume la LED ; si la tension est supérieure à 3 V, il ne se produit rien.

- Le temporisateur est déclenché lorsqu'une tension inférieure ou égale au tiers de la tension d'alimentation est appliquée à la broche de déclenchement.
- La LED reste allumée lorsque vous relâchez le bouton.
- Vous pouvez appuyer sur le bouton aussi longtemps que vous le souhaitez, mais d'une durée inférieure au temps de cycle du temporisateur ; la durée d'allumage de la LED reste constante.

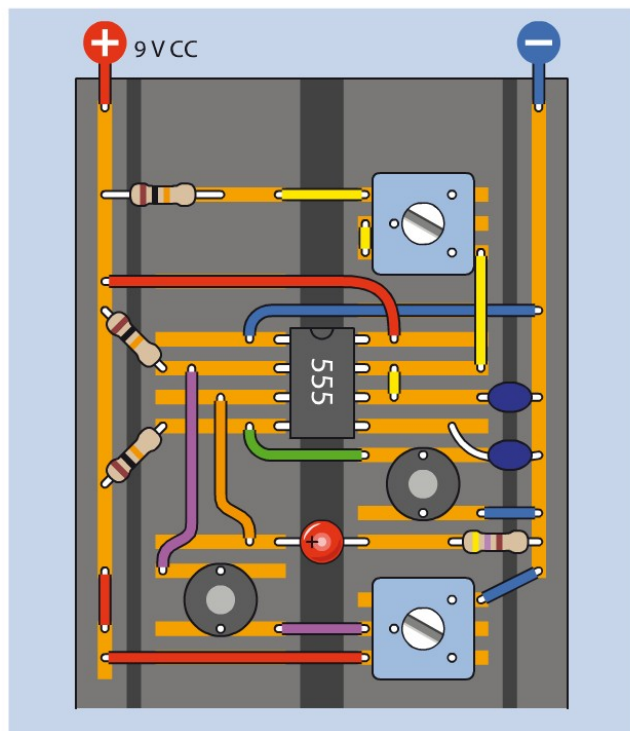


Figure 4-14. Connexions internes de la platine d'essai câblée pour le test du temporisateur.

La figure 4-15 illustre de façon graphique le comportement du temporisateur. Le 555 convertit un comportement imparfait de son environnement en une sortie précise et contrôlée. Il ne se déclenche pas de façon réellement instantanée, mais assez rapidement pour en donner l'illusion.

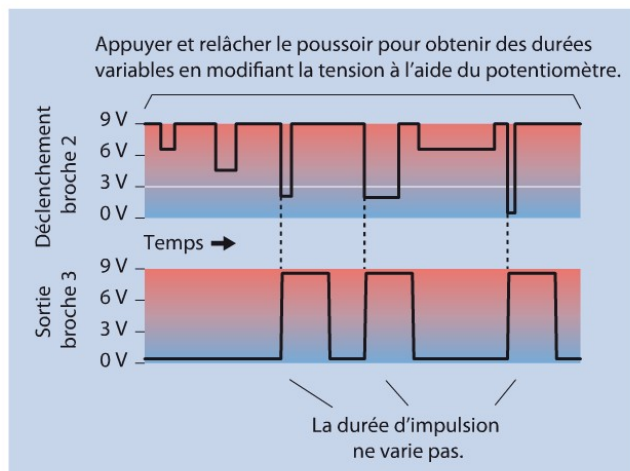


Figure 4-15. Comportement du temporisateur 555 en réponse à une tension de valeur et de durée variables, appliquée à sa broche de déclenchement.

Essayez maintenant de déclencher le temporisateur tout en ajustant le potentiomètre de 500K dans différentes positions. Vous observerez alors que cela modifie la durée de l'impulsion générée.

La résistance entre la broche 7 et le pôle positif de l'alimentation détermine la durée de l'impulsion du temporisateur (en fonction de la valeur du condensateur relié à la broche 6).

Voici un autre essai à faire. Réglez le potentiomètre de 500K afin de générer une impulsion assez longue. Appuyez sur le poussoir A, puis appuyez rapidement sur le poussoir B qui va stopper l'impulsion avant qu'elle ne se termine normalement. Maintenez le bouton B enfoncé et essayez de déclencher le temporisateur à nouveau à l'aide du bouton A. Rien ne se passe.

La broche 4 est la broche de réinitialisation. Lorsque vous la reliez à la masse, vous forcez le temporisateur à interrompre son fonctionnement, quel que soit son état, et cela le maintient inactif jusqu'à ce qu'elle cesse d'être reliée à la masse.

Pour terminer, relâchez le bouton B et maintenez l'appui sur le bouton A. Cela va prolonger la durée de l'impulsion du temporisateur jusqu'à ce que vous relâchiez A.

En maintenant un niveau bas sur la broche de déclenchement, le temporisateur est réenclenché indéfiniment.

Les résistances de 10K reliées aux broches 2 et 4 sont nommées *résistances de tirage au niveau haut* (pullup resistors). En reliant directement leur extrémité côté broche à la masse, on force l'application d'un niveau contrariant l'effet de la résistance.

Le concept de résistance de tirage est important lorsqu'on utilise des circuits intégrés, car on ne doit jamais laisser une broche non reliée. Lorsqu'une broche n'est reliée à rien, elle est dite flottante et peut provoquer un dysfonctionnement car elle est capable de capter des champs électriques aléatoires et ainsi, de prendre une valeur de tension inconnue, variant d'un instant à l'autre.

Il existe également des *résistances de rappel au niveau bas* (pulldown resistor). Cependant, le temporisateur 555 ne nécessite que des résistances de tirage au niveau haut car les broches 2 et 4 sont maintenues à leur niveau normal par une tension positive et sont activées par un niveau bas.

Le temporisateur 555 est déclenché ou réinitialisé par des niveaux bas appliqués respectivement aux broches 2 et 4.

Contrôle de la durée de l'impulsion

En étudiant le schéma de la figure 4-11, vous voyez qu'une tension positive est appliquée sur la broche 7 (de décharge) au travers de la résistance de 10K et du potentiomètre ajustable de 500K – la résistance de 10K est présente afin d'éviter que la broche 7 ne soit reliée directement au pôle positif de l'alimentation.

Après avoir traversé le potentiomètre de 500K, le courant peut atteindre le condensateur de 15 μF . Il s'agit donc d'un réseau RC. À l'intérieur du temporisateur, un circuit astucieux mesure en permanence la tension aux bornes du condensateur de 15 μF et l'utilise pour mettre fin à son impulsion de sortie.

Vous pouvez vérifier cela par vous-même en positionnant le potentiomètre de 500K pour qu'il génère une impulsion de durée élevée, puis mesurez la tension avec votre multimètre, à l'extrémité gauche du condensateur de 15 μF . Vous devriez voir la tension monter jusqu'à ce qu'elle atteigne environ 6 V. Le temporisateur utilise ce signal pour mettre fin à son impulsion de sortie et cette tension redescend à nouveau car le 555 la relie à la masse de façon interne. C'est pour cela que la broche 7 est appelée la broche de décharge.

Quand la tension aux bornes du condensateur de temporisation atteint les 2/3 de la tension d'alimentation, le temporisateur met fin à l'impulsion de sortie.

Toutefois, pourquoi les broches de décharge et de seuil sont-elles reliées ? Vous allez le découvrir dans l'expérience suivante, quand le temporisateur sera connecté de façon à produire une série d'impulsions plutôt qu'une seule ; il fonctionnera alors selon le mode *astable* ou *multivibrateur*. Pour l'instant, vous l'utilisez selon le mode *monostable* (ou *monocoup*).

- Dans le mode monostable, le temporisateur ne délivre qu'une seule impulsion en réponse à un signal de déclenchement.
- Dans le mode astable (ou multivibrateur), il génère une série d'impulsions de façon continue.

Vous vous interrogez peut-être sur la présence du condensateur de 0,01 μF relié à la broche 5 (de contrôle). Si vous lui appliquez une tension, vous pouvez contrôler la sensibilité du temporisateur. Puisque nous n'utilisons pas cette possibilité, il est recommandé de relier un condensateur à la broche 5, afin de se prémunir contre toute fluctuation de sa tension et ainsi éviter le fonctionnement anormal du circuit.

Attention : mettre les broches dans le bon ordre

Dans tous les schémas de ce livre, les circuits intégrés sont représentés exactement comme vous les voyez sur une plaque d'essai, leurs broches étant placées en ordre numérique. Dans les autres schémas que vous pouvez trouver, en ligne ou dans d'autres livres, il n'en est pas de même. Dans un souci de clarification des schémas, les dessinateurs réorganisent souvent la séquence des numéros de broches. De même, on ne représente jamais une platine d'essai avec un bus d'alimentation positif et un bus de masse de chaque côté. La figure 4-16 montre le même circuit que celui de la figure 4-11 dont les broches ont été réorganisées pour simplifier les connexions et minimiser les croisements.

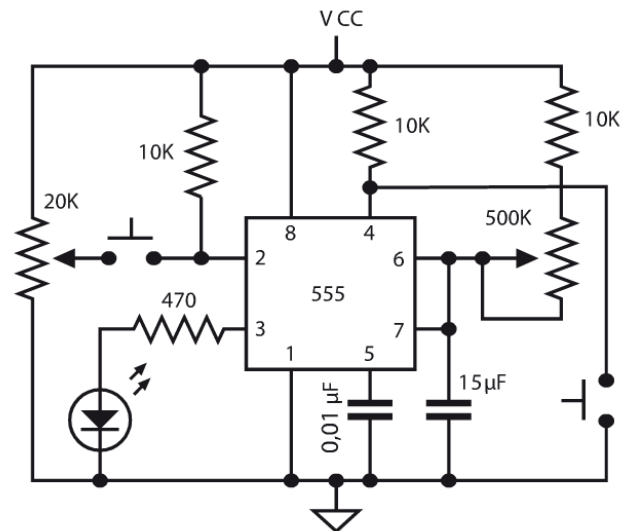


Figure 4-16. Ce circuit est fonctionnellement identique au circuit de test précédent, mais les broches du circuit intégré ont été réorganisées afin de simplifier le schéma.

D'une certaine façon, la réorganisation des broches permet de créer un circuit plus facile à comprendre, en particulier si le pôle positif de l'alimentation est en haut et la masse en

bas. Cependant, vous devrez la plupart du temps convertir sa représentation physique sur une feuille de papier avant de pouvoir le réaliser sur une plaque d'essai.

Fondamentaux : durée de temporisation

Lorsque vous avez réalisé le réseau RC de l'expérience 9, des calculs fastidieux avaient été nécessaires pour déterminer la durée nécessaire au condensateur pour atteindre une certaine tension. En utilisant un temporisateur 555, tout devient plus simple. Vous n'avez plus qu'à chercher dans une table la durée de son impulsion de sortie (figure 4-17). La valeur de la résistance connectée entre la broche 7 et le pôle positif de l'alimentation est en haut du tableau, la valeur du condensateur de temporisation est indiquée dans la colonne de gauche, les valeurs de cette table indiquent la durée approximative de l'impulsion en secondes.

	10K	22K	47K	100K	220K	470K	1M
1 000 µF	11	24	52	110	240	520	1 100
470 µF	5,2	11	24	52	110	240	520
220 µF	2,4	5,2	11	24	52	110	240
100 µF	1,1	2,4	5,2	11	24	52	110
47 µF	0,52	1,1	2,4	5,2	11	24	52
22 µF	0,24	0,53	1,1	2,4	5,3	11	24
10 µF	0,11	0,24	0,52	1,1	2,4	5,2	11
4,7 µF	0,052	0,11	0,24	0,52	1,1	2,4	5,2
2,2 µF	0,024	0,052	0,11	0,24	0,53	1,1	2,4
1,0 µF	0,011	0,024	0,052	0,11	0,24	0,52	1,1
0,47 µF		0,011	0,024	0,052	0,11	0,24	0,52
0,22 µF			0,011	0,024	0,052	0,11	0,24
0,1 µF				0,011	0,024	0,052	0,11
0,047 µF					0,011	0,024	0,052
0,022 µF						0,011	0,024
0,01 µF							0,011

Figure 4-17. Durée d'impulsion (en secondes) d'un temporisateur 555 fonctionnant en mode monostable, pour différentes valeurs de la résistance et du condensateur de temporisation. Les durées sont indiquées avec deux chiffres significatifs.

- Des résistances de valeurs inférieures à 1K ne doivent pas être utilisées.
- Les valeurs de résistance inférieures à 10K ne sont pas souhaitables car elles augmentent la consommation électrique du circuit.

- Des condensateurs de valeur supérieure à 100 µF peuvent produire des durées imprécises car leur courant de fuite devient comparable au courant de charge.

Que se passe-t-il si vous souhaitez obtenir une durée supérieure à 1 100 secondes, ou inférieure à 0,01 seconde ? Ou encore une durée intermédiaire entre deux valeurs de la table ?

Vous pouvez utiliser la formule simplifiée qui suit, où T est la durée d'impulsion en secondes, R est la valeur de la résistance en kilo-ohms et C est la valeur du condensateur en microfarads :

$$T = R \times C \times 0,0011$$

Gardez en tête que le résultat n'est pas tout à fait exact car les valeurs de la résistance et du condensateur peuvent être imprécises, et aussi à cause de l'intervention d'autres paramètres, comme la température de fonctionnement.

Théorie : le 555 en mode monostable

Le boîtier en plastique du temporisateur 555 contient une puce de silicium sur laquelle sont gravés des dizaines de transistors selon une disposition qui est trop complexe pour être expliquée ici. Cependant, je peux résumer leur fonction en les classant par groupes (figure 4-18).

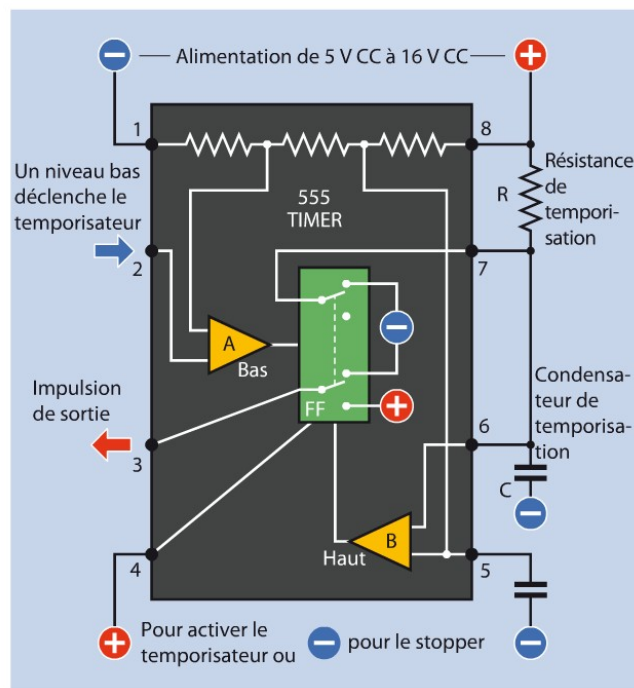


Figure 4-18. Représentation simplifiée des fonctions internes d'un temporisateur 555 utilisé en mode monostable.

Les symboles négatif et positif à l'intérieur du circuit représentent les pôles de l'alimentation provenant, respectivement, des broches 1 et 8. J'ai volontairement omis les connexions internes de ces broches.

Les deux triangles jaunes sont des *comparateurs*. Chacun compare ses deux entrées (à la base du triangle) et délivre une sortie (au sommet du triangle) qui dépend de la différence de niveau entre ses entrées. FF est une *basculer bistable* (flip flop), un composant logique qui peut se stabiliser dans un état ou l'autre. Je l'ai représentée par un double interrupteur à deux positions, bien que ce soit un circuit électronique.

Durant l'initialisation, lorsque vous appliquez la tension d'alimentation au circuit, la bascule est en position haute et délivre un niveau bas à la broche de sortie 3. Si la bascule reçoit un signal du comparateur A, elle bascule vers sa position basse et y reste. Lorsqu'elle reçoit un signal du comparateur B, elle retourne à sa position haute et y demeure. Les indications Bas et Haut près des comparateurs vous rappellent l'action provoquée par chacun d'eux lorsqu'il est activé.

Remarquez la présence d'une liaison qui relie la broche 7 au condensateur C. Tant que la bascule est en position haute, elle annule la tension positive provenant de la résistance R par la broche 7 et évite ainsi au condensateur de se charger positivement.

Si la tension sur la broche 2 décroît au tiers de la tension d'alimentation, le comparateur A le détecte et force la bascule vers son état bas. Ceci provoque l'envoi d'une impulsion positive sur la broche 3, la sortie, et annule la liaison à la masse de la broche 7. Le condensateur peut maintenant commencer à se charger au travers de la résistance. Durant cette charge, la sortie positive du temporisateur est maintenue.

Alors que la tension aux bornes du condensateur augmente, le comparateur B en assure la vérification par l'intermédiaire de la broche 6. Quand le condensateur est chargé aux 2/3 de la tension d'alimentation, le comparateur B envoie une impulsion à la bascule, qui retourne à sa position haute d'origine. Cela provoque la décharge du condensateur au travers de la broche 7. La bascule met également fin à l'impulsion positive sur la broche de sortie 3 en la remplaçant par la masse de l'alimentation. C'est ainsi que le 555 retourne à son état d'origine.

Résumons cette séquence d'événements.

1. Initialement, la bascule met à la masse le condensateur et la sortie (broche 3).
2. Une chute de tension de la broche 2 au tiers de la tension d'alimentation ou moins rend la sortie (broche 3) positive et permet au condensateur C de commencer à se charger au travers de la résistance R.
3. Lorsque le condensateur atteint les 2/3 de la tension d'alimentation, le circuit décharge le condensateur et la broche de sortie 3 retourne au niveau bas.

Fondamentaux : suppression des impulsions parasites

Lorsque la tension d'alimentation est appliquée à un temporisateur configuré en mode monostable, le temporisateur a tendance à émettre une impulsion de façon spontanée avant de se mettre au repos, en attente d'un déclenchement. C'est ennuyeux dans beaucoup de circuits.

Une façon d'éviter ce phénomène consiste à placer un condensateur de 1 μF entre la broche de réinitialisation (*reset*) et la masse. Le condensateur absorbe le courant de la broche et la met à la masse au moment où l'alimentation est appliquée et maintient cette broche au niveau bas pendant un court instant – juste assez longtemps pour éviter que le temporisateur n'émette son impulsion parasite à la mise sous tension. Lorsque le condensateur est chargé, il ne sert plus et la broche de réinitialisation est maintenue positive par une résistance de 10K afin qu'elle n'influence plus le fonctionnement du temporisateur. Je réutiliserai le concept de suppression d'impulsion dans les expériences qui suivent.

Fondamentaux : utilité du 555

En mode monostable, le temporisateur 555 émet une seule impulsion de durée fixe (mais programmable). Pouvez-vous en imaginer des applications ? Pensez, par exemple, à une impulsion du temporisateur 555 qui contrôlerait un autre composant, un détecteur de mouvement pour une lumière extérieure, par exemple. Quand le détecteur infrarouge détecte quelque chose qui bouge, la lumière s'allume pendant une durée déterminée, contrôlable par le temporisateur.

Une autre application possible concerne un grille-pain. Quand vous introduisez une tranche de pain, un interrupteur se ferme et déclenche la cuisson. Pour en modifier la durée, vous pouvez utiliser un potentiomètre et le fixer au levier de commande externe afin de déterminer le temps de chauffage. À la fin de l'opération, la sortie du

temporisateur 555 traverse un transistor de puissance et active un solénoïde (semblable à un relais, sauf qu'il ne possède pas de contacts d'interrupteur), qui libérerait la tranche.

Le fonctionnement intermittent des essuie-glaces d'une voiture peut aussi être contrôlé par un temporisateur 555. C'était le cas sur les premiers véhicules qui en étaient pourvus. La vitesse de répétition des touches du clavier de l'Apple II était également contrôlée ainsi.

Et qu'en est-il de l'alarme de l'expérience 15 ? Une des fonctions qu'elle devait remplir était de pouvoir attendre assez longtemps pour vous permettre de l'arrêter avant qu'elle ne retentisse. La sortie d'un temporisateur 555 pourrait s'en charger.

L'expérience que vous venez de réaliser paraît simple mais elle ouvre la voie à de nombreuses perspectives.

Fondamentaux : le mode bistable

Le mode bistable implique de neutraliser ses fonctions fondamentales.

La figure 4-19 montre un circuit réalisable en quelques minutes. Sur la gauche, vous voyez deux résistances de tirage au niveau haut de 10K chacune. La résistance de 470 Ω en bas protège la LED. Ajoutez deux interrupteurs tactiles, le circuit intégré du temporisateur et vous en aurez terminé.

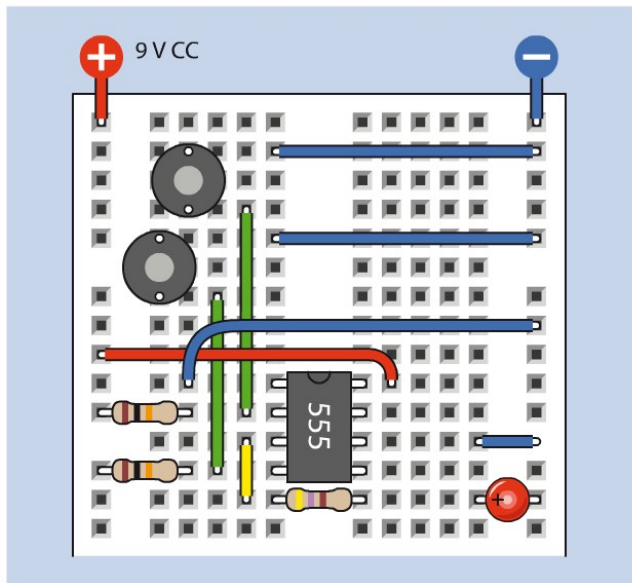


Figure 4-19. Réalisation sur une platine d'essai du circuit permettant au temporisateur 555 de fonctionner en mode bistable.

Lorsque vous avez terminé votre câblage, appuyez puis relâchez l'interrupteur du haut ; la LED s'allume, aussi longtemps que l'alimentation est maintenue. La sortie du temporisateur est maintenue ainsi indéfiniment.

Appuyez maintenant sur le bouton du bas ; la LED s'éteint. Elle ne se rallumera que lorsque vous appuierez à nouveau sur le bouton du haut.

Ce circuit permet au temporisateur de se comporter comme une bascule bistable. Il bascule sa sortie au niveau haut lorsque vous mettez à la masse la broche 2 et il y reste. Il bascule sa sortie à l'état bas lorsque vous mettez à la masse sa broche 4 et il la maintient ainsi. Les bascules bistables sont très importantes dans les circuits numériques. J'y reviendrai un peu plus tard mais, pour l'instant, étudions leur fonctionnement et leur utilité.

Regardez le schéma de la figure 4-20. Vous constatez qu'il n'y a ni résistance, ni condensateur à droite. Le circuit RC est absent ; ce circuit ne possède donc pas d'éléments de temporisation. Normalement, lorsque vous déclenchez le temporisateur, l'impulsion de sortie cesse lorsque le condensateur de temporisation atteint une tension égale aux 2/3 de la tension d'alimentation. Cependant, la broche 6 étant à la masse, elle ne peut jamais atteindre cette valeur. En conséquence, quand vous déclenchez le temporisateur, son impulsion de sortie ne cesse jamais.

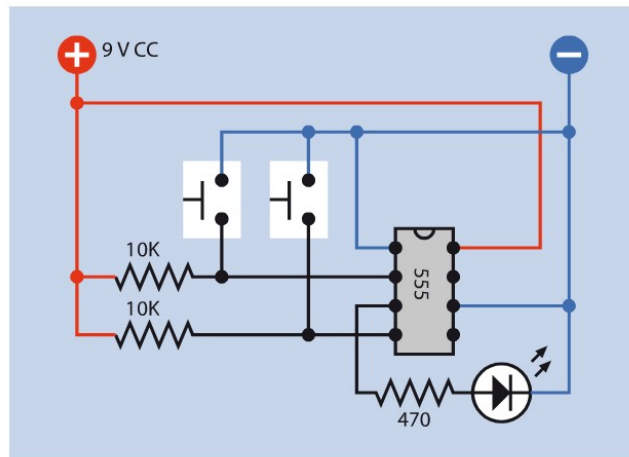


Figure 4-20. Circuit de test du temporisateur 555 en mode bistable.

Vous pouvez, bien entendu, mettre fin à l'impulsion de sortie en appliquant un niveau bas à la broche de réinitialisation. Elle restera ainsi jusqu'à ce que vous réenclenchiez à nouveau le temporisateur.

Cette configuration est appelée bistable car elle est stable aussi bien quand sa sortie est haute que quand elle est au niveau bas. Une bascule de ce type est également appelée *verrou (latch)*.

- Une impulsion de niveau bas sur la broche 2 rend la sortie positive (niveau haut) et la verrouille dans cet état.
- Une impulsion négative sur la broche 4 rend la sortie négative (niveau bas) et la verrouille ainsi.

Vous devez maintenir les broches 2 et 4 au niveau haut lorsque vous ne le déclenchez pas. C'est pour cela que sont prévues les résistances de tirage dans le schéma.

Il est acceptable de laisser la broche 5 du temporisateur non reliée car nous l'utilisons de façon extrême ; un signal aléatoire sur cette broche restera sans effet.

Pourquoi utiliserions-nous un temporisateur de cette façon ? Vous allez être surpris de découvrir combien cela peut être utile. Je vais m'en servir dans trois expériences, dans la suite de ce livre. Le 555 n'a pas été vraiment conçu pour fonctionner en mode bistable mais il peut s'avérer aussi utile dans ce cas.

Historique : naissance du temporisateur

En 1970, alors que seulement une demi-douzaine d'entreprises étaient implantées dans la Silicon Valley, la société Signetics achète une idée de l'ingénieur Hans Camenzind. Le concept ne constitue pas une avancée décisive : seulement 23 transistors et un groupe de résistances qui fonctionnent comme un temporisateur programmable. Celui-ci est polyvalent, stable et simple, mais son prix de vente initial refroidit. Grâce à la technologie naissante des circuits intégrés, Signetics parvient à reproduire l'ensemble sur une puce de silicium.

Cela a commencé par des essais infructueux, Camenzind travaille seul, développant l'ensemble à grande échelle sur une plaque de montage, à l'aide de transistors, de résistances et de diodes. Une fois que l'ensemble fonctionne, il commence à attribuer des valeurs légèrement différentes aux composants afin de contrôler si le circuit accepte des variations de production ou, pour d'autres raisons, comme les variations de température lors de l'utilisation de la puce. Il crée au moins 10 versions du circuit, ce qui l'occupe pendant des mois.

Puis Camenzind s'assied à une table à dessin et utilise un couteau X-Acto particulier pour graver le circuit sur une grande feuille de plastique. Signetics réduit ensuite l'image photographiquement selon un rapport 300:1, la grave

sur de minuscules tranches semi-conductrices et insère chacune d'elles dans un rectangle en plastique d'un demi-pouce (1,27 cm) avec la référence du produit imprimée sur la partie supérieure. Le temporisateur 555 est né.

Il s'avère être la puce la plus fructueuse de l'histoire, à la fois par le nombre d'unités vendues (des dizaines de milliards) et par la longévité du concept (identique depuis près de 40 ans). Le temporisateur 555 est présent aussi bien dans les jouets que dans les navettes spatiales. Il permet de faire clignoter une lumière, de déclencher une alarme, d'espacer des bips ou de créer les bips eux-mêmes.

Aujourd'hui, les puces sont conçues par des équipes nombreuses et testées en simulant leur comportement à l'aide de logiciels. Ainsi, les puces d'un ordinateur servent à la conception de nouvelles puces. L'époque où les ingénieurs comme Camenzind travaillaient en solo est révolue, mais son génie demeure dans chaque temporisateur 555 qui sort des usines de fabrication.

En 2010, alors que j'écrivais L'électronique en pratique, j'ai cherché Hans Camenzind sur Internet et découvert qu'il avait un site web indiquant un numéro de téléphone. Spontanément, je l'ai appelé. Ce fut étrange de parler à l'homme ayant conçu le circuit intégré que j'utilise depuis plus de 30 ans. Il a été amical (bien que peu loquace) et a accepté de relire mon ouvrage. Après sa lecture, il a accordé son soutien au livre de façon encore plus amicale. Par la suite, je me suis procuré sa propre histoire de l'électronique Much ado about almost nothing, qui est toujours disponible en ligne et que je vous recommande vivement. J'ai été honoré d'avoir eu l'opportunité de parler à l'un des pionniers de la conception des circuits intégrés. J'ai appris avec tristesse son décès en 2012.

Fondamentaux : spécifications du temporisateur 555

- Le temporisateur fonctionne à partir d'une source de tension stable comprise entre 5 et 16 V. La valeur maximale est de 18 V CC. De nombreuses fiches techniques fournissent leurs spécifications pour une tension d'alimentation de 15 V CC. Cette tension n'a pas besoin d'être régulée.
- Pour la plupart, les fabricants recommandent une plage entre 1K et 1M pour la résistance associée à la broche 7. Toutefois, une valeur inférieure à 10K provoque une consommation excessive du circuit intégré. Ainsi, il est préférable de réduire la valeur du condensateur, plutôt que celle de la résistance.

- Le condensateur peut avoir une valeur aussi élevée que vous le souhaitez, pour produire des durées réellement importantes, mais la précision du temporisateur en pâtira car le courant de fuite du condensateur peut devenir comparable à la valeur de son intensité de charge.
- Le temporisateur impose une chute de tension supérieure à celle créée par un transistor ou une diode ; la tension de sortie sera supérieure ou égale à 1 V.
- La sortie peut fournir ou absorber une intensité jusqu'à 200 mA. Cependant, un courant supérieur à 100 mA provoquera une chute de la tension de sortie pouvant affecter la précision de la temporisation.

Attention : tous les temporisateurs ne se valent pas

Tout ce que j'ai dit jusqu'à présent s'applique à l'ancienne version TTL du temporisateur 555. TTL signifie *transistor-transistor logic*. Cette technologie a précédé les versions modernes CMOS du circuit intégré, qui consomment une puissance bien plus faible. La version TTL du temporisateur est également appelée *version bipolaire*, car elle contient des transistors bipolaires.

L'avantage de la version d'origine du 555 est son très faible coût et sa robustesse. Vous aurez du mal à le détruire et sa sortie est assez puissante pour être reliée directement à la bobine d'un relais ou à un petit haut-parleur. Le 555 n'est cependant pas efficace et il a tendance à générer des pics parasites qui influencent parfois le fonctionnement d'autres circuits intégrés.

Pour remédier à ces désavantages, une nouvelle version du 555 a été développée en utilisant des transistors CMOS, qui nécessitent moins de puissance. De plus, ce circuit intégré ne génère plus de pics parasites. En contrepartie, sa sortie est plus limitée (variable selon le fabricant de la puce).

Malheureusement, il y a un manque de standardisation entre les diverses versions CMOS du temporisateur 555. Certaines se vantent de pouvoir fournir un courant de 100 mA, alors que d'autres sont limitées à 10 mA.

Pour ajouter à la confusion, les versions CMOS ont des identificateurs variés. Le 7555 identifie clairement une version CMOS, d'autres identifications font précéder le nombre 555 d'un groupe de lettres ou chiffres différents. De ce fait, c'est à vous d'y faire attention et de comprendre leur signification.

Dans ce livre, afin d'éviter toute confusion et de simplifier, je n'utilise que la version TTL du temporisateur 555, également connue sous le nom de version bipolaire.

Expérience 17 : créez un son

Maintenant que vous vous êtes familiarisé avec le temporisateur 555 en mode monostable ou bistable, découvrons son mode *astable* (ou *multivibrateur*), ainsi appelé car sa sortie varie constamment entre les niveaux haut et bas et qu'il ne se stabilise jamais à l'un de ces états.

Cela ressemble à la sortie de l'oscillateur à transistors que vous avez réalisé dans l'expérience 11. Il est en revanche plus universel et plus facile à contrôler et, au lieu de deux transistors, quatre résistances et deux condensateurs, vous n'avez besoin que d'un circuit intégré, deux résistances et un condensateur.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré temporisateur 555
- 1 haut-parleur miniature
- 1 résistance de 47 Ω , 4 de 470 Ω , 2 de 1K, 12 de 10K et 1 de 100K
- 8 condensateurs de 0,01 μF , 1 de 0,022 μF , 1 de 0,1 μF , 3 de 1 μF , 1 de 3,3 μF , 4 de 10 μF et 2 de 100 μF
- 1 diode 1N4148
- 1 potentiomètre ajustable de 100K
- 1 interrupteur tactile
- 4 LED génériques

Test du mode astable

La figure 4-21 représente un circuit astable typique. J'ai relié un haut-parleur à sa sortie, car le temporisateur va générer une fréquence audible. Le haut-parleur est relié par une résistance afin de limiter le courant de sortie et un condensateur de couplage qui laisse passer les fréquences audibles, tout en bloquant le courant continu. Les valeurs des composants sont exposées dans le schéma 4-22.

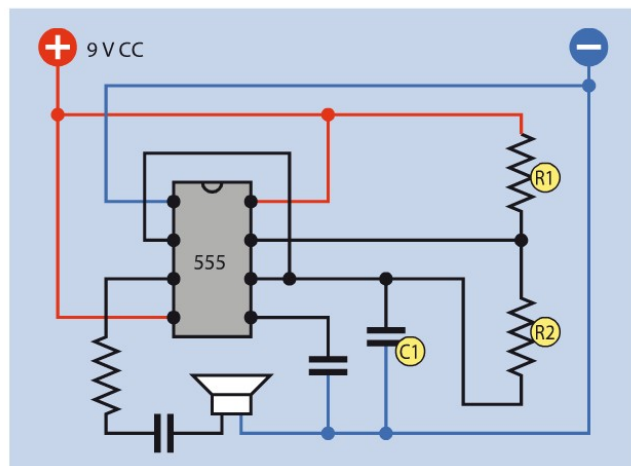


Figure 4-21. Circuit de base du temporisateur 555 en mode astable.

Les composants R1, R2 et C1 contrôlent la vitesse du temporisateur. Je respecte ici les conventions d'identification qui sont utilisées dans les fiches techniques.

C1 a le même rôle que la capacité de temporisation du circuit monostable de la figure 4-11. La présence de deux résistances au lieu d'une sera expliquée par la suite.

En utilisant les connaissances que vous avez acquises durant l'expérience 16, essayez de déterminer le fonctionnement de ce circuit. Pour commencer, vous voyez qu'il ne possède pas d'entrée. La broche 2 (déclenchement) est reliée à la broche 6 (seuil). C1 va se charger, comme lorsqu'il était en mode monostable, jusqu'à ce qu'il atteigne les 2/3 de la tension d'alimentation. Dès lors, il va se décharger au travers de R2 reliée à la broche 7 et sa tension va décroître. Sa connexion à la broche 2 permet à la broche de déclenchement de recevoir la tension décroissante de C1. Quand la tension de déclenchement baisse rapidement, le temporisateur est déclenché. Ainsi, dans cette configuration, le temporisateur va se réenclencher automatiquement.

À quelle vitesse cela va-t-il se produire ? Il est préférable que vous réalisiez ce circuit de test pour le déterminer. La figure 4-22 vous renseigne sur les valeurs des composants et le schéma redessiné montre un potentiomètre ajustable, vous pourrez ainsi constater (ou plutôt entendre) l'effet provoqué par la variation de cette résistance. Le potentiomètre ajustable et la résistance de 10K s'ajoutent à R2. Le condensateur de temporisation C1 a une capacité de 0,022 μF et R1 vaut 10K.

La figure 4-23 montre le plan de câblage sur une plaque de montage tandis que la figure 4-24 indique les valeurs des composants.

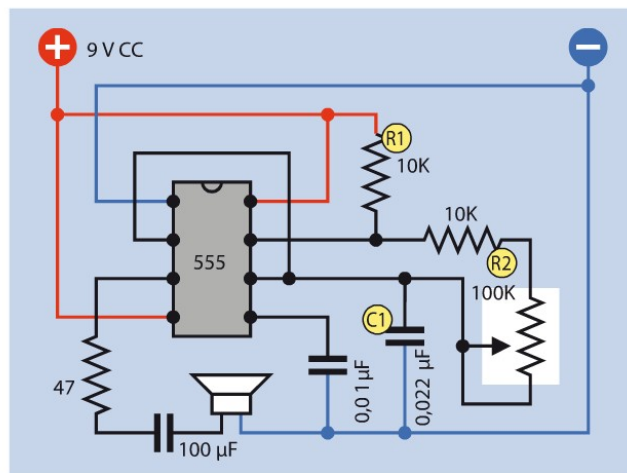


Figure 4-22. Ce circuit de test vous permet d'ajuster la vitesse du temporisateur en mode astable.

Lorsque vous alimentez le circuit, vous entendez immédiatement un son diffusé par le haut-parleur. Si vous n'entendez rien, vous avez probablement fait une erreur de câblage.

Remarquez que vous ne devez plus activer le temporisateur à l'aide d'un bouton-poussoir. Le 555 se déclenche automatiquement, comme nous l'avons prévu.

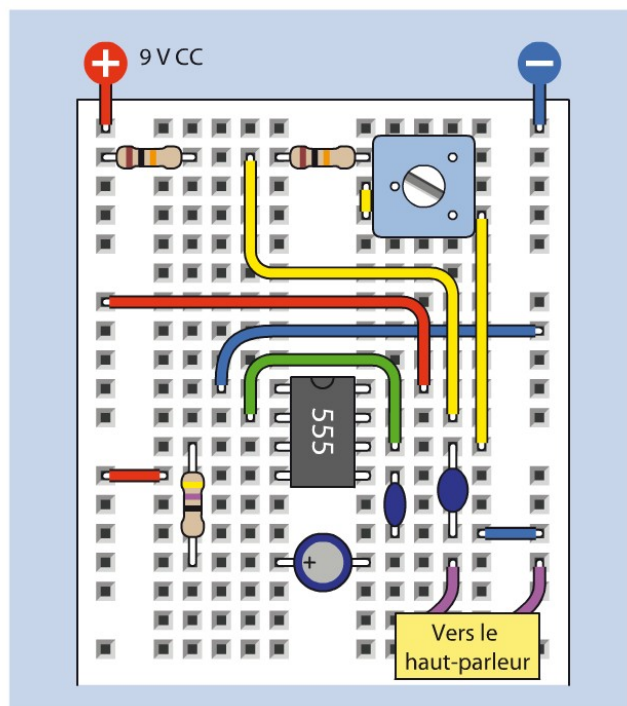


Figure 4-23. Plan du circuit sur une plaque de montage.

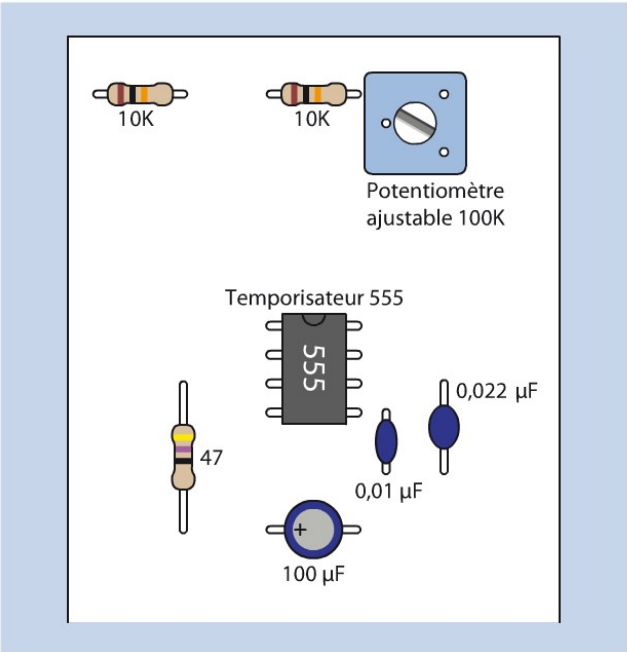


Figure 4-24. Valeurs des composants du circuit de test du multivibrateur.

Tournez la vis du potentiomètre ; la tonalité du son doit varier. Le potentiomètre ajustable contrôle la vitesse de charge et de décharge de C1 ; c'est ce qui détermine la longueur d'un cycle haut par rapport au cycle bas du signal audio. Avec ces valeurs, le son varie approximativement entre 300 et 2 200 impulsions par seconde. Le temporisateur transmet ces impulsions au haut-parleur et font vibrer sa membrane qui émet des ondes de haute et basse pression dans l'air. Votre oreille les reçoit sous forme d'une tonalité sonore.

Théorie : la fréquence de sortie

La fréquence du son représente le nombre de cycles complets par seconde, comprenant une impulsion de haute pression suivie d'une impulsion de basse pression.

L'unité de fréquence est le *hertz* (Hz), qui est équivalent à « cycles par seconde ». Ce nom a été adopté en Europe, en mémoire d'un autre pionnier de l'électricité, Heinrich Hertz. La sortie de votre circuit de test du temporisateur 555 sera donc approximativement comprise entre 300 Hz et 2 200 Hz.

Comme pour toutes les unités, le préfixe k, signifiant « kilo », peut être ajouté ; ainsi, 2 200 Hz s'écrit également 2,2 kHz.

Si R1 et R2 sont exprimées en kilo-ohms et C1 en microfarads, la fréquence en Hertz, est donnée par la formule suivante : $f = 1\,440 / ((2 \times R2) + R1) \times C1$

Pour éviter ce calcul complexe, voici un tableau de valeurs (figure 4-25) où le *présupposé de départ* est : R1 vaut 10K. Les valeurs en haut du tableau sont celles de R2. Les valeurs dans la colonne de gauche sont celles du condensateur C1. Vous vous rappelez, sans doute, que l'abréviation pF signifie « picofarad » qui est le millionième de microfarad. Le nanofarad est la valeur intermédiaire entre microfarad et picofarad, mais je ne l'ai pas utilisé dans ce tableau.

	10K	22K	47K	100K	220K	470K	1M
47 µF	1	0,57	0,3	0,15	0,068	0,032	0,015
22 µF	2,2	1,2	0,63	0,31	0,15	0,069	0,033
10 µF	4,8	2,7	1,4	0,69	0,32	0,15	0,072
4,7 µF	10	5,7	3,0	1,5	0,68	0,32	0,15
2,2 µF	22	12	6,3	3,1	1,5	0,69	0,33
1,0 µF	48	27	14	6,9	3,2	1,5	0,72
0,47 µF	100	57	30	15	6,8	3,2	1,5
0,22 µF	220	120	63	31	15	6,9	3,3
0,1 µF	480	270	140	69	32	15	7,2
0,047 µF	1K	570	300	150	68	32	15
0,022 µF	2,2K	1,2K	630	310	150	69	33
0,01 µF	4,8K	2,7K	1,4K	690	320	150	72
4 700 pF	10K	5,7K	3K	1,5K	680	320	150
2 200 pF	22K	12K	6,3K	3,1K	1,5K	690	330
1 000 pF	48K	27K	14K	6,9K	3,2K	1,5K	720
470 pF	100K	57K	30K	15K	6,8K	3,2K	1,5K
220 pF	220K	120K	63K	31K	15K	6,9K	3,3K
100 pF	480K	270K	140K	69K	32K	15K	7,2K

Figure 4-25. Pour un temporisateur 555 fonctionnant en mode astable, les valeurs du haut sont celles de R2, pour un circuit standard dans lequel R1 vaut 10K. Les valeurs du tableau sont les fréquences du temporisateur, en Hertz (cycles par seconde).

Théorie : le 555 en mode astable

Afin de mieux comprendre ce qui se passe quand le temporisateur fonctionne en mode astable, étudiez la figure 4-26. La configuration interne est exactement la même que celle du mode monostable, mais les liaisons externes sont différentes.

Au départ, comme précédemment, la bascule met le condensateur de temporisation C1 à la masse. En revanche, la tension appliquée au condensateur provient

de la broche 2, qui est reliée à la broche 6 par une connexion externe. La tension basse indique au circuit intégré de se déclencher indépendamment du reste. La bascule répond en passant à sa position basse, ce qui transmet un niveau positif au haut-parleur, tout en retirant le niveau négatif de la broche 6.

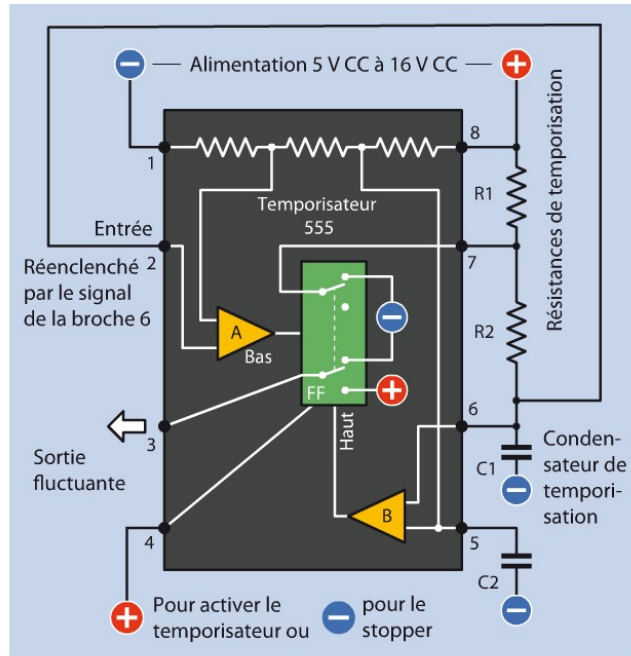


Figure 4-26. Vue interne du temporisateur 555 avec les liaisons externes permettant son fonctionnement en multivibrateur.

C1 commence à se charger, comme lorsque le temporisateur fonctionnait en mode monostable, à la différence qu'il se charge maintenant en passant par $R1+R2$ en série. Comme le condensateur a une valeur faible, il se charge rapidement. Lorsque C1 atteint $2/3$ de la tension d'alimentation, le comparateur B le décharge et met fin à l'impulsion de sortie sur la broche 3.

Le condensateur se décharge par R2, qui est reliée à la broche de décharge 7. Pendant que le condensateur se décharge, sa tension diminue pour atteindre le tiers de la tension d'alimentation, ou moins, et le comparateur A envoie un autre signal à la bascule, redémarrant un cycle complet.

Fondamentaux : déséquilibre des impulsions hautes et basses

Quand le temporisateur fonctionne en mode multivibrateur, C1 se charge à travers R1 et R2 en série. Cependant, quand C1 se décharge, il se vide uniquement à travers R2.

Comme le condensateur se charge en passant par deux résistances et se décharge par une seule, son temps de charge est plus long que la décharge. Lorsqu'il se charge, la sortie de la broche 3 est au niveau haut ; quand il se décharge, la broche 3 est au niveau bas. C'est la raison pour laquelle le cycle haut est toujours plus long que le cycle bas (figure 4-27).

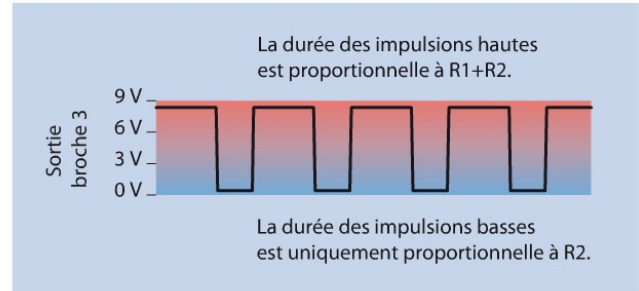


Figure 4-27. Quand le circuit intégré temporisateur 555 est câblé pour fonctionner selon le mode astable, les impulsions de sortie haute sont toujours plus longues que l'espace qui les sépare.

Si vous souhaitez obtenir des durées d'impulsions égales, ou si vous voulez les régler indépendamment – par exemple pour envoyer une impulsion courte à un autre circuit, avec un temps important avant l'envoi de la suivante –, vous devez ajouter une diode, comme sur la figure 4-28 (avec une alimentation supérieure à 5 V CC).

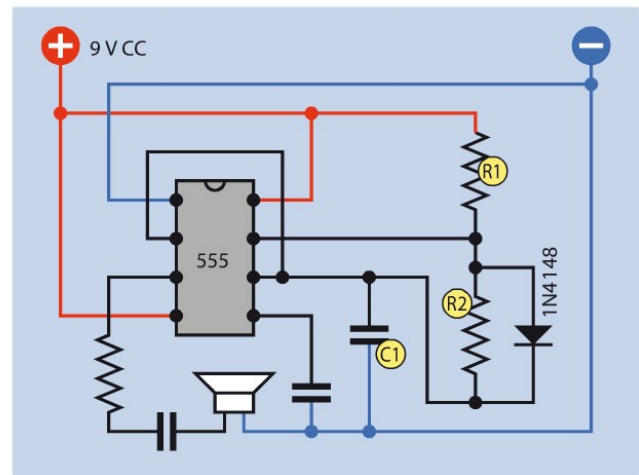


Figure 4-28. L'ajout d'une diode qui court-circuite R2 permet d'ajuster séparément la durée des impulsions hautes et basses.

Pendant la charge de C1, le courant s'écoule à travers R1, comme précédemment, mais cette fois, il contourne R2 en passant par la diode. Quand C1 se décharge, la diode bloque le courant de décharge qui s'écoule ainsi dans R2.

R1 contrôle maintenant la charge et R2 contrôle le temps de décharge. La formule qui permet de calculer la fréquence est approximativement la suivante :

$$\text{Fréquence} = 1\,440 / ((R1 + R2) \times C1)$$

R1 et R2 sont exprimées en kilo-ohms et C1 en microfarads. Si j'emploie le terme « approximativement » c'est que la diode ajoute une résistance de faible valeur au circuit qui n'est pas pris en compte dans la formule.

Si vous prévoyez $R1 = R2$, vous devriez obtenir des impulsions de même durée.

Modifications astables

Au lieu d'utiliser un potentiomètre pour faire varier la valeur de R2, la fréquence du temporisateur peut être légèrement modifiée en utilisant la broche 5 (figure 4-29).

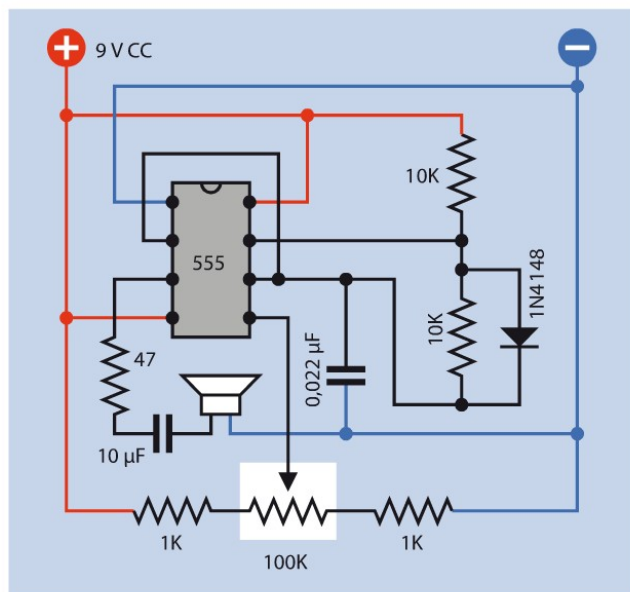


Figure 4-29. Circuit permettant de modifier la fréquence du temporisateur en utilisant la broche 5.

Déconnectez le condensateur relié à cette broche et remplacez-le par les résistances en série du schéma. Elles assurent que la broche 5 n'est jamais reliée directement à l'un des deux pôles de l'alimentation, mais à travers une résistance de 1K, au minimum. S'il était directement connecté à l'alimentation, le temporisateur ne serait pas endommagé, mais il ne pourrait générer aucun son audible. En tournant le potentiomètre, la fréquence varie. C'est le changement de tension de référence du comparateur interne B qui provoque cet effet.

Chaînage des circuits intégrés

Les temporisateurs 555 peuvent être reliés en chaîne, selon quatre possibilités (figures 4-30 à 4-33). Ces configurations fonctionnent que le temporisateur soit en mode astable ou monostable, sauf indication contraire.

- Si vous utilisez une tension d'alimentation de 9 V pour un temporisateur 555, sa sortie est suffisante pour alimenter un second.
- La sortie d'un temporisateur 555 peut déclencher l'entrée d'un second. Cela ne fonctionne que si ce dernier est en mode monostable, puisqu'en mode astable, il se déclenche automatiquement.
- La sortie d'un temporisateur peut débloquent l'entrée de réinitialisation d'un autre temporisateur.
- La sortie d'un temporisateur peut être reliée à la broche de contrôle d'un second, en passant par une résistance de valeur adaptée.

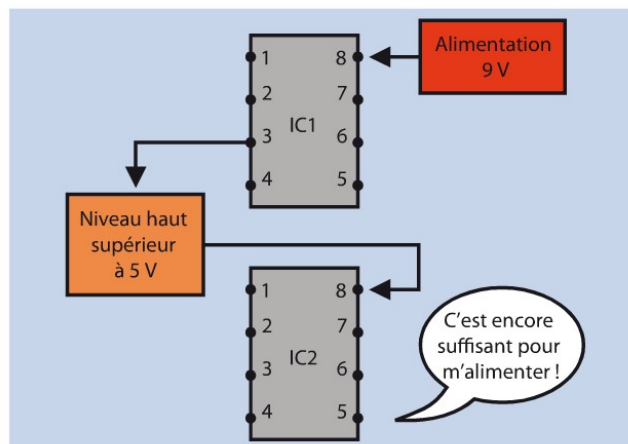


Figure 4-30. Un temporisateur peut en alimenter un second.

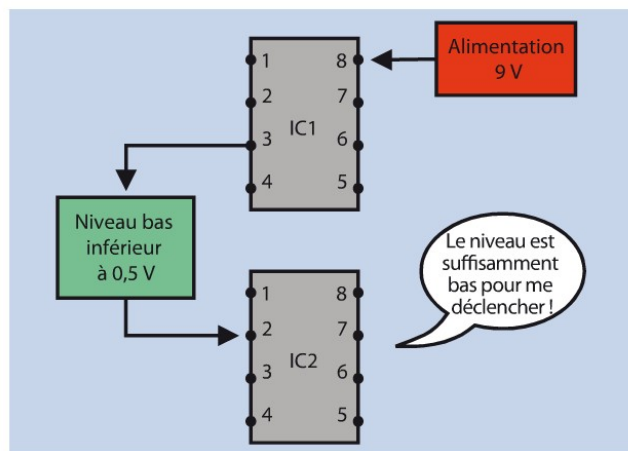


Figure 4-31. Un temporisateur peut en déclencher un second.

Dans le cas où les temporisateurs en mode monostable sont reliés en chaîne, comment démarrent-ils ? Lors de l'expérience 16, nous avons vu qu'un temporisateur 555 en mode monostable génère une impulsion lorsqu'il est sous tension. Dans une chaîne de temporisateurs, ils vont tous le faire en même temps et, comme ils présentent de petites différences de fabrication, le résultat est imprévisible. Ils vont parfois entamer une séquence correcte, parfois ils vont clignoter par paire.

Pour résoudre ce problème, il faut mettre en œuvre le concept de suppression de l'impulsion parasite que j'ai décrit dans l'expérience 16 (voir la section « Fondamentaux : suppression des impulsions parasites » page 143).

Un condensateur de 1 μF entre la broche de réinitialisation et la masse maintient la broche au niveau bas suffisamment longtemps pour supprimer l'impulsion de départ. Une résistance de tirage de 10K sur cette broche maintient un niveau haut, quand le temporisateur fonctionne.

Selon mon expérience, malgré le peu de documentation qui existe sur le comportement de la broche de réinitialisation, vous ne devriez pas rencontrer de difficultés. Si la suppression des impulsions de départ pose problème, essayez d'utiliser un condensateur de plus forte valeur.

Parfois, un problème subsiste avec des temporisateurs reliés en chaîne : le circuit de suppression de l'impulsion de départ étant trop efficace, il ne se passe rien, car toutes les sorties de temporisateurs ont été supprimées.

La façon d'y remédier consiste à ne pas placer de condensateur de suppression de l'impulsion parasite sur l'un des temporisateurs. Il va *probablement* générer une impulsion à la mise sous tension, ce qui va déclencher le reste de la séquence (figure 4-34).

Cependant, que signifie le mot « probablement » ? En électronique, les circuits doivent toujours fonctionner, sans laisser de place au doute. Dans les faits, les temporisateurs 555 peuvent avoir un comportement imprévisible, au moment de leur mise sous tension. C'est pourquoi j'ai ajouté un bouton-poussoir, en haut du circuit, qui peut être actionné pour démarrer manuellement la séquence.

Une autre solution consiste à faire fonctionner le premier temporisateur en mode astable. Il génère une série d'impulsions qui se propagent aux autres temporisateurs configurés en mode monostable, le dernier ne réenclenchant pas le premier. En électronique, on appelle le premier le maître et les autres les esclaves.

Cette configuration a le mérite de fonctionner de manière totalement prévisible. La difficulté est de régler correctement la fréquence du temporisateur maître, afin qu'il génère l'impulsion suivante, dès que le dernier esclave de la chaîne aura terminé de générer son impulsion. Dans le cas contraire, le maître générera la prochaine impulsion trop tôt, ou il y aura un temps mort entre la dernière impulsion du dernier esclave et l'impulsion suivante du maître.

L'importance de ce phénomène dépend de l'application. Pour des guirlandes lumineuses, ce ne sera pas un problème, mais si vous augmentez la vitesse pour piloter un moteur pas à pas, le réglage correct de la temporisation sera difficile.

Un son de sirène

La quatrième possibilité qu'offre l'assemblage des temporisateurs en chaîne (figure 4-34) est particulièrement intéressante, car elle permet de générer un son très similaire à celui de la sirène d'un système d'alarme. On peut tout à fait utiliser cette configuration pour la sortie audio du projet d'alarme commencé à l'expérience 15.

Le circuit est représenté sur la figure 4-35. Le premier temporisateur est configuré en mode astable ; vous pouvez le reconnaître, il est comparable à celui de la figure 4-22. Les valeurs des composants étant plus élevées, le temporisateur oscille plus lentement, à environ 1 Hz. Vous pouvez comparer ce circuit avec celui que j'ai suggéré sur la figure 2-120 ; le principe est le même.

Le deuxième temporisateur est également câblé en mode astable, mais il fonctionne aux alentours de 1 kHz. Le principe consiste à appliquer la tension variant lentement du premier temporisateur à la broche de contrôle du second, le forçant ainsi à moduler sa sortie sonore à la manière désagréable d'une sirène d'alarme.

Je vous encourage à réaliser ce circuit, car vous pourriez l'utiliser dans la version finale du système d'alarme qui fera l'objet de l'expérience 18 (voir le plan de câblage, figure 4-36 et les valeurs des composants, figure 4-37).

Lorsque votre circuit fonctionnera, il pourrait être intéressant de remplacer le condensateur placé entre la masse et la broche 5 du premier temporisateur, par un condensateur de 100 μF . Ce dernier provoquera un glissement de fréquence progressif au lieu d'une modification brutale. Je l'utilise de la même façon que le condensateur de l'expérience 11 (pour que la LED s'allume puis faiblisse progressivement).

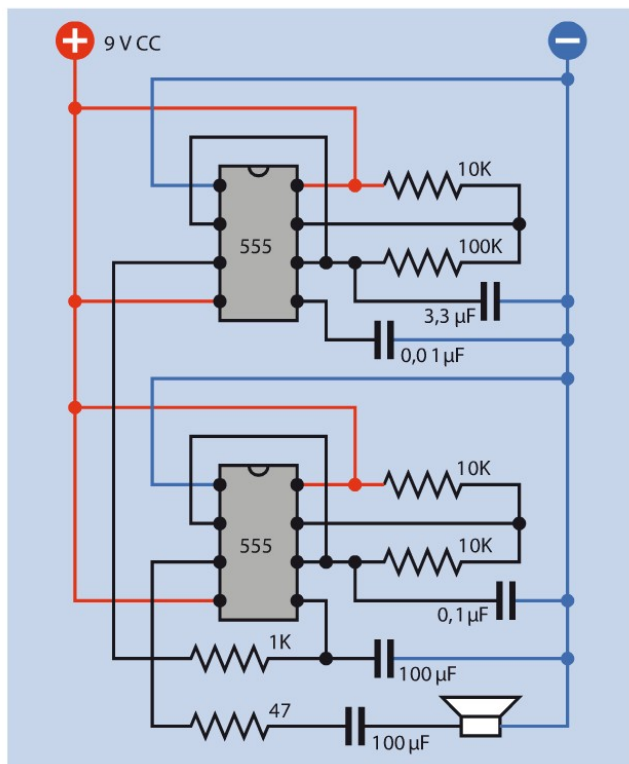


Figure 4-35. Quand un premier temporisateur fonctionne relativement lentement afin de faire varier le suivant par sa broche de contrôle (broche 5), il en résulte un son modulé comparable à celui d'une sirène d'alarme.

Il existe d'autres façons de modifier le son. Voici quelques suggestions :

- Faites varier le condensateur de temporisation de 0,1 μF afin d'augmenter ou diminuer la tonalité de base du son.
- Doublez la valeur du condensateur de 100 μF placé sur la broche 5, ou divisez-la par deux.
- Remplacez la résistance de 1K par un potentiomètre de 10K.
- Changez la valeur du condensateur de 3,3 μF .

Une partie du plaisir de réaliser un circuit consiste à l'adapter pour le rendre plus personnel. Quand le son de votre sirène vous conviendra, notez les valeurs des composants pour y revenir plus tard.

Vous pouvez réduire le nombre de circuits intégrés de ce montage, en utilisant un double temporisateur 556 au lieu de deux 555. Le 556 contient une paire de 555 en un seul boîtier. Comme le nombre de liaisons vers l'extérieur (en dehors de l'alimentation) reste le même, je n'ai pas considéré cette possibilité.

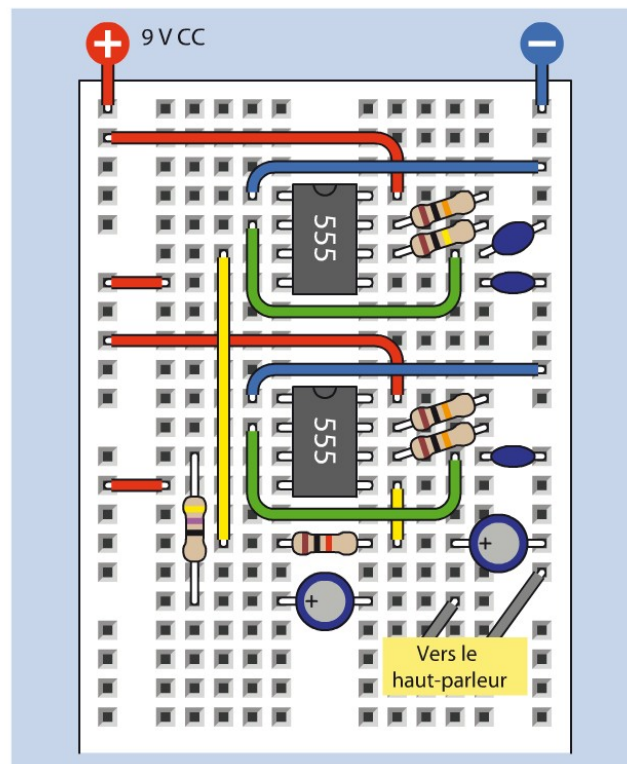


Figure 4-36. Réalisation du circuit de la sirène.

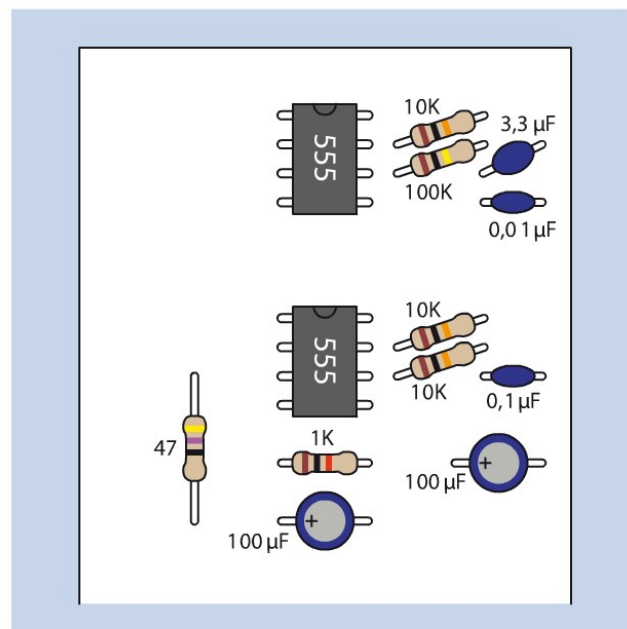


Figure 4-37. Valeurs des composants du circuit de la sirène.

Expérience 18 : l'alarme d'intrusion (presque) terminée

Maintenant que vous connaissez le temporisateur 555, vous pouvez compléter les fonctionnalités souhaitées qui n'ont pas encore été intégrées.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 2 circuits intégrés temporisateurs 555
- 1 relais DPDT de 9 V
- 2 transistors 2N2222
- 1 LED de couleur rouge, une verte et une jaune
- 2 interrupteurs à glissière de type SPDT pour plaque de montage
- 1 bouton-poussoir tactile
- 1 condensateur de 0,01 μF , 2 de 10 μF et 2 de 68 μF
- 4 résistances de 470 Ω , 4 de 10K, 1 de 100K et 2 de 1M
- 1 diode 1N4001

En option, pour la sortie sonore :

- Les composants de la figure 4-36

En option, pour une réalisation définitive de ce projet :

- 1 fer à souder de 15 W
- Du fil de soudure fin
- 1 plaque cuivrée perforée de façon identique à une plaque de montage
- 1 interrupteur SPDT ou DPDT
- 1 interrupteur bouton-poussoir SPST
- 1 petit coffret d'environ 15 $\times$ 8 $\times$ 5 cm
- 1 prise jack d'alimentation et l'embase correspondante
- Plusieurs détecteurs de présence magnétiques, selon le nombre d'issues à protéger
- Fil souple en quantité suffisante pour relier les détecteurs de présence de votre maison

Trois étapes vers un système fonctionnel

Ce circuit est le plus important et le plus complexe que vous ayez abordé jusqu'à présent. Il est cependant facile à construire, car il est constitué de trois parties indépendantes que vous pourrez tester avant de les assembler. Vous aboutirez au montage qui est représenté sur la figure 4-44 (valeur des composants : figure 4-45 et schéma : figure 4-46). Nous allons commencer par un petit circuit avec un seul temporisateur.

Étape 1

Observez attentivement la figure 4-38. Vous remarquez qu'aucun composant de temporisation n'est placé à droite du 555. Vous pouvez en déduire qu'il s'agit de la version bistable du circuit décrit dans l'expérience 16 (figure 4-20). Quand le temporisateur est déclenché, sa sortie restera indéfiniment au niveau haut, ce qui semble convenir à un système d'alarme.

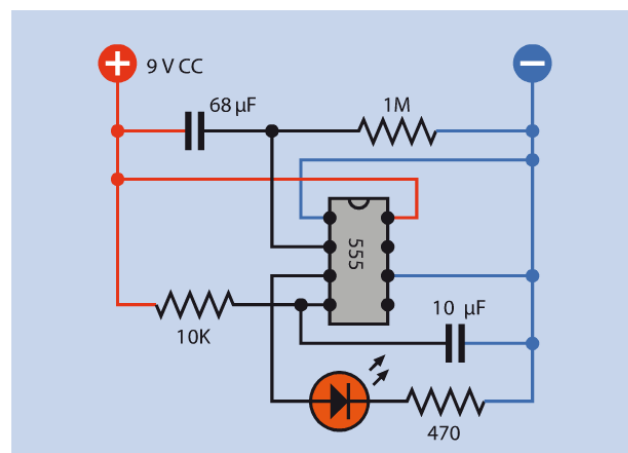


Figure 4-38. Schéma équivalent de la partie basse du circuit sur la plaque de montage.

Ce n'est pas tout. Ce circuit vous accorde une minute de grâce pour désarmer le système d'alarme quand vous entrez dans la zone protégée (point 9 du cahier des charges).

Pour comprendre comment il fonctionne, assemblez les composants de la figure 4-39. Les emplacements sont importants car vous devez réserver de la place pour les sections du circuit qui seront ajoutées par la suite.

Pour vous assurer d'avoir inséré tous les éléments à la bonne place, vérifiez que la résistance de 1M sur la droite se trouve bien à la 29^e rangée de la platine, en partant du haut.

L'alimentation est reliée près des composants (et non en haut de la plaque) et le pôle positif n'est pas encore connecté.

Réglez votre multimètre pour la mesure d'une tension d'au moins 10 V CC et reliez-le aux points indiqués sur la figure 4-39, la pointe de touche négative étant reliée au bus d'alimentation négatif et la pointe de touche positive à l'extrémité gauche de la résistance de 1M.

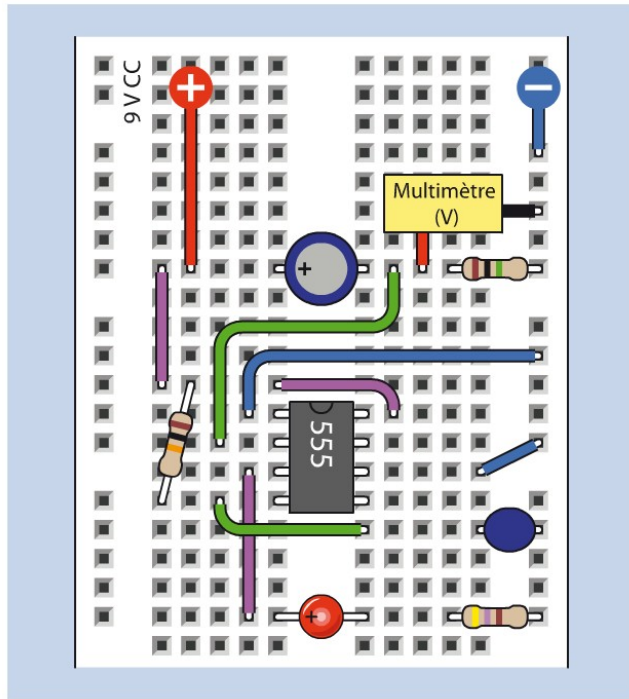


Figure 4-39. Placement des composants en bas de la plaque, avant le test du circuit.

Connectez maintenant l'alimentation au circuit. Vous devriez voir la tension décroître, en partant de 9 V. Quand elle atteint un tiers de la valeur de la tension d'alimentation, le temporisateur 555 se déclenche et la LED rouge s'allume. Cette dernière a été ajoutée pour les besoins du test ; dans la version finale, elle sera remplacée par le générateur sonore.

Le gros condensateur de 68 μF retarde le déclenchement du temporisateur. Lorsque la tension d'alimentation est appliquée au circuit, le condensateur transmet l'impulsion originale au point de liaison avec la résistance de 1M, qui est reliée à la broche de déclenchement du temporisateur par le fil vert. Cette broche est donc au niveau haut à la mise en marche et le temporisateur ne fait rien tant qu'elle ne passe pas au niveau bas.

La charge du condensateur s'écoule très lentement par la liaison de son côté droit, à travers la résistance de 1M. Après un temps suffisant, sa tension devient alors assez basse pour déclencher le temporisateur.

Nous avons vu dans les expériences 16 et 17 comment supprimer les impulsions parasites à la mise sous tension. C'est pour cela que le condensateur de 10 μF et la résistance de 10K sont présents sur la broche de réinitialisation 4. J'ai prévu un condensateur de 10 μF et non plus 1 μF , car ce circuit réagit plus lentement que celui de l'expérience 17.

- Vous pouvez utiliser un temporisateur 555 avec ces composants à tout moment, si vous désirez retarder la sortie du temporisateur en réponse à une impulsion de déclenchement.
- Utilisez une valeur supérieure à 68 μF si vous désirez obtenir un délai plus important.

Cette partie du circuit va imposer un délai à la mise sous tension, puis activera la mise en veille de l'alarme, pour une durée indéterminée.

Étape 2

Les figures 4-40 et 4-41 montrent l'étape suivante de la construction du circuit. Les composants que vous avez placés précédemment sont toujours présents, mais ils sont maintenant grisés afin que vous portiez votre attention sur les nouveaux éléments ajoutés.

N'oubliez pas d'installer S2, l'interrupteur à glissière en bas, prévu pour les tests, et la résistance de 470 Ω située à proximité, ainsi que les deux longs fils jaunes. Il simule les capteurs d'alarme que vous utiliserez dans l'installation finale.

La fonction du relais est la même que dans l'expérience 15. En fait, si vous suivez les connexions du circuit, vous verrez qu'il fonctionne de façon identique à celui de la figure 3-88, mais avec deux légers changements. Les différences concernent la résistance de 470 Ω qui remplace celle de 1K et l'interrupteur S1, ajouté en haut avec une LED verte.

Insérez tous les composants avec soin. Ne focalisez pas votre attention sur les trois fils rouges à gauche, ni sur les trois fils bleus à droite. Assurez-vous que les broches du relais sont correctement alignées et reliées par des fils.

Vérifiez que S1 est bien en position basse et S2 en position haute. Pour le test, retirez le condensateur de 68 μF , afin que la LED réagisse immédiatement, sans attendre le délai d'une minute.

Reliez l'alimentation. Si vous avez correctement réalisé le circuit, rien ne devrait se passer. L'interrupteur S2 représente les capteurs d'alarme et il est en position haute, simulant leur fermeture. Basculez-le vers le bas, pour simuler une intrusion ; la LED de test en bas du circuit

devrait s'allumer immédiatement. Remettez l'interrupteur en position haute ; la LED doit rester allumée. Le circuit a verrouillé l'alarme qui est déclenchée, quel que soit l'état des capteurs.

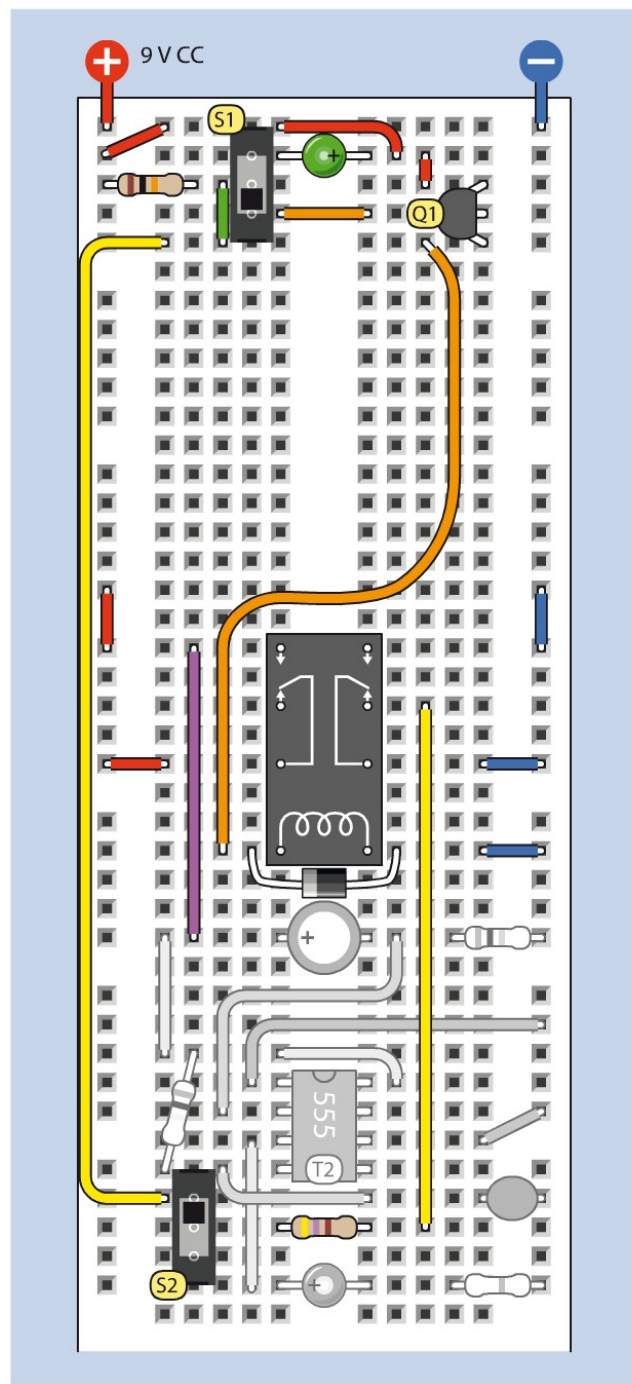


Figure 4-40. Deuxième étape de la réalisation du circuit comprenant la configuration avec le relais de l'expérience 15.

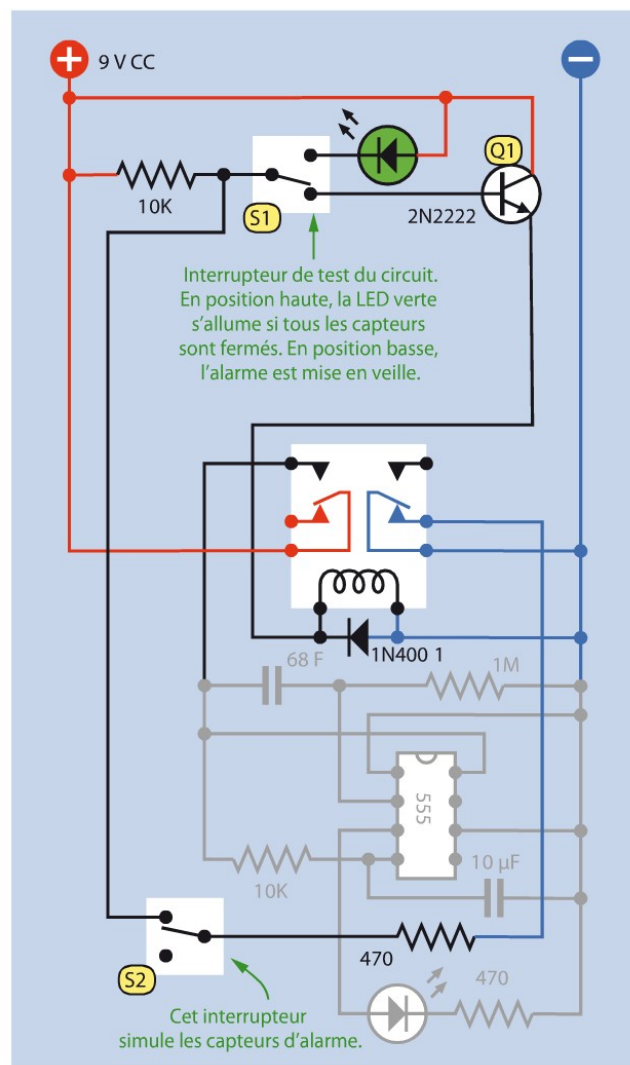


Figure 4-41. Schéma équivalent du circuit de l'étape 2.

Déconnectez l'alimentation, laissez S2 en position haute – pour simuler les contacts des capteurs fermés –, puis appliquez à nouveau la tension d'alimentation. Déplacez maintenant l'interrupteur S1 (en haut) en position haute ; la LED verte doit alors s'allumer. C'est une fonctionnalité de test. Elle vérifie que tous les capteurs sont fermés. Si vous utilisez cette alarme, vous devrez faire ce test avant de quitter les lieux. Ceci répond à la première partie du point 7 du cahier des charges de l'expérience 15.

Laissez S1 en position haute, puis abaissez S2, afin de simuler l'ouverture d'un capteur. La LED verte doit s'éteindre. Déplacez à nouveau l'interrupteur S2 en position haute ; la LED verte doit s'allumer derechef. La procédure de test fonctionne donc correctement.

Voyons maintenant comment vous pourriez utiliser ce circuit. Maintenez S1 en position haute (position de test). Lorsque vous êtes prêt à quitter l'espace protégé, mettez le circuit sous tension. Si la LED verte ne s'allume pas, cela signifie qu'une fenêtre ou une porte est ouverte quelque part. Recherchez la cause de ce problème pour y remédier. Lorsque la LED verte est allumée, vous pouvez être sûr que toutes les issues (les capteurs) sont fermées. Vous pouvez alors armer l'alarme. Déplacez l'interrupteur S1 vers le bas. La LED verte s'éteint et l'alarme passe en veille. Lorsque vous revenez chez vous, le temporisateur 555 vous accorde une minute pour désarmer l'alarme, afin d'éviter qu'il ne se déclenche (à condition que vous ayez replacé le condensateur de 68 μF dans le circuit). Déplacez S1 vers le haut (position de test) pour désactiver l'alarme.

Regardons maintenant comment fonctionne le circuit.

La résistance de 10K en haut à gauche est reliée à la base du transistor Q1 en passant par l'interrupteur S1, lorsqu'il est en position basse. Pendant ce temps, le contact de droite du relais est relié à la masse. Cette connexion traverse le fil jaune à droite du relais, puis rejoint la résistance de 470 Ω puis, passe à travers l'interrupteur S2 (qui simule les capteurs), retourne par l'autre fil jaune en haut du circuit, ce qui maintient la base du transistor à un niveau bas (par le fil orange). Comme la base est à un niveau bas, le transistor ne conduit pas.

Si le contact d'un capteur s'ouvre, la base du transistor n'est plus au niveau bas, la résistance de 10K lui imposant un niveau haut, afin qu'il devienne conducteur. Il déclenche alors le relais par l'intermédiaire du long fil orange. Le relais alimente le temporisateur bistable qui va pouvoir déclencher l'alarme. Au même moment, le relais coupe la liaison de droite vers la masse ; le transistor peut donc continuer à être conducteur, même si le contact du capteur est refermé.

C'est exactement le même concept que le circuit de la figure 3-88, la seule différence étant la LED verte. Quand on place S1 en position de test, il interrompt la liaison du transistor au pôle positif de l'alimentation (ainsi, le transistor ne peut pas déclencher l'alarme). Si tous les capteurs sont fermés, la LED est reliée par leur intermédiaire en passant à travers la résistance de 470 Ω à la masse de l'alimentation ; elle s'allume, pour indiquer que le système est prêt.

Étape 3

Si vous utilisez ce système d'alarme, vous devrez l'armer avant de quitter les lieux, mais si vous ouvrez une porte pour sortir, vous allez déclencher l'alarme.

Le temporisateur bistable, muni de son condensateur de 68 μF , ajouté de façon à éviter le déclenchement de l'alarme pendant une minute lorsque vous rentrez, vous laisse le temps de l'arrêter. De la même manière, nous avons besoin d'un autre temporisateur pour supprimer le déclenchement de l'alarme pendant une minute quand vous quittez la zone protégée.

La mise en œuvre est un peu plus compliquée et consiste à disposer d'un autre temporisateur qui force la base du transistor Q1 au niveau bas afin qu'il ne puisse pas déclencher le relais.

La sortie du temporisateur passe au niveau haut lorsqu'il s'active, pas au niveau bas, ceci constitue un problème. Il faut donc ajouter un transistor supplémentaire qui convertit la sortie haute du temporisateur en niveau bas et qui force la tension de la base du transistor à ce niveau.

Les figures 4-42 et 4-43 montrent les composants qui vont permettre ceci. Une fois encore, les composants disposés précédemment ont été grisés.

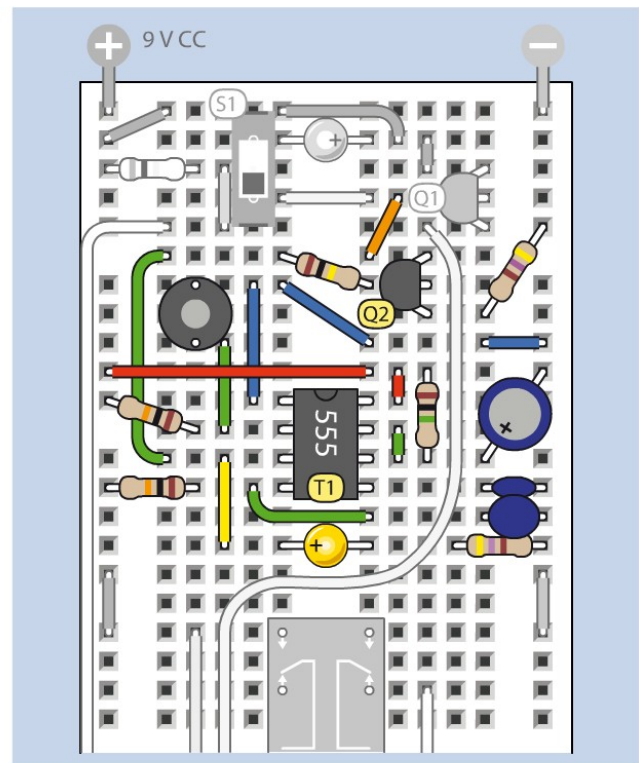


Figure 4-42. Troisième et dernière étape de la réalisation du circuit.

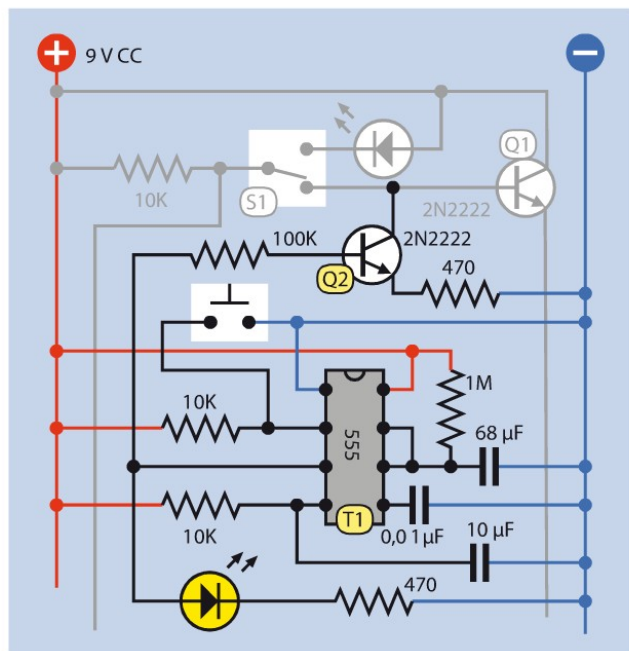


Figure 4-43. Représentation schématique de la troisième étape.

Le temporisateur 555 ajouté est identifié T1 ; il possède un circuit sur sa broche 4 (réinitialisation) afin que, comme les autres temporisateurs, il ne génère pas de signal parasite lors de la mise sous tension. Appuyez sur le bouton-poussoir pour déclencher T1. Le poussoir agit en mettant à la masse la broche de déclenchement du temporisateur.

Lorsque la sortie du temporisateur est au niveau haut, le courant fourni par la broche 3 (la sortie) allume la LED jaune. Ceci indique que le système décompte le temps avant de se mettre en veille. Tant que la LED jaune reste allumée, le système d'alarme ignore toute ouverture d'un capteur.

La broche 3 est également reliée à un fil vert à gauche, ayant la forme d'un C allongé. Ce fil rejoint une résistance de 100K, qui est reliée à la base de Q2, le second transistor. En passant par la résistance de 100K, la sortie du temporisateur rend le transistor Q2 conducteur. Son émetteur est relié à la masse par une résistance de 470 Ω et son collecteur est relié à la base de Q1. Ainsi, tant que Q2 est conducteur, la base de Q1 est mise à la masse, ce qui l'empêche de déclencher le relais et l'alarme.

De cette façon, T1 empêche l'alarme de se déclencher. Quand la minute de grâce est écoulée, T1 cesse d'être conducteur, la base du premier transistor n'est plus maintenue au niveau bas et l'alarme peut se déclencher – si vous avez pris soin de basculer l'interrupteur S1 en haut, hors de la position test.

Vous pouvez, maintenant, utiliser le système de la façon suivante :

1. Mettez tout d'abord S1 en position de test et refermez toutes les portes et les fenêtres, jusqu'à ce que la LED verte soit allumée.
2. Déplacez S1 en position basse, afin d'activer la mise en veille de l'alarme.
3. Appuyez sur le bouton et quittez les lieux en refermant la porte derrière vous, la LED jaune étant allumée.

Cette version du circuit remplit-elle la fonction que l'on en attend ? Oui, si vous l'avez correctement câblée. Le temporisateur T1 doit allumer la LED jaune dans tous les cas, ce qui facilite la vérification du circuit. Vous pouvez également relier la pointe de touche de votre multimètre à la base du transistor Q1, afin de vérifier si la tension est basse ou plus élevée. Si la tension est faible, l'alarme n'est pas mise en veille. Lorsque Q1 atteint un niveau plus élevé, l'alarme est prête.

N'oubliez pas de remplacer le condensateur de 68 μF dans le circuit, près du relais, afin de réactiver le délai du temporisateur quand vous mettez votre alarme en mode veille.

La réalisation complète du circuit sur la plaque d'essai est représentée sur la figure 4-44.

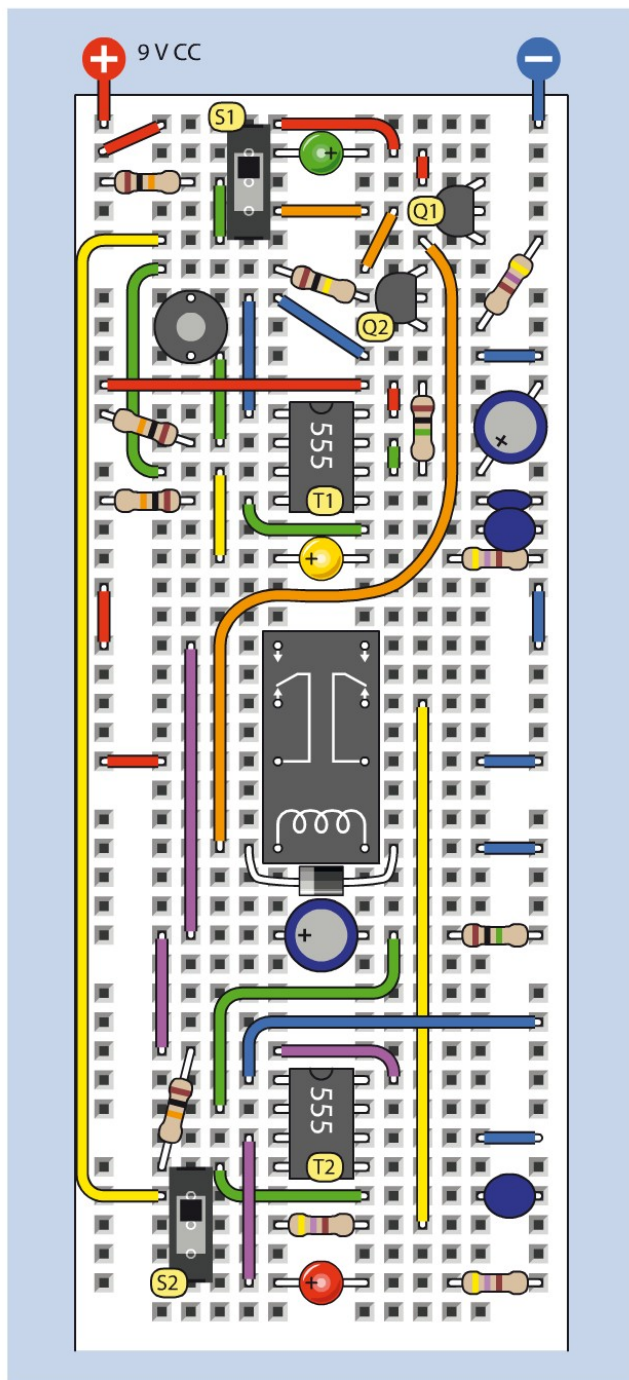


Figure 4-44. Le circuit complet sur une plaque de montage.

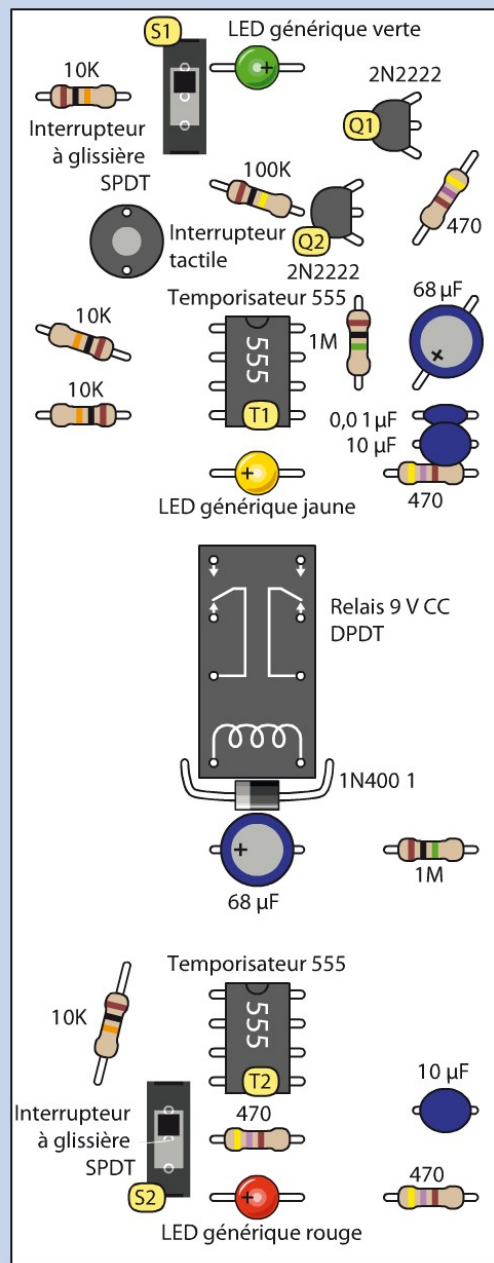


Figure 4-45. Valeur des composants de la plaque de montage.

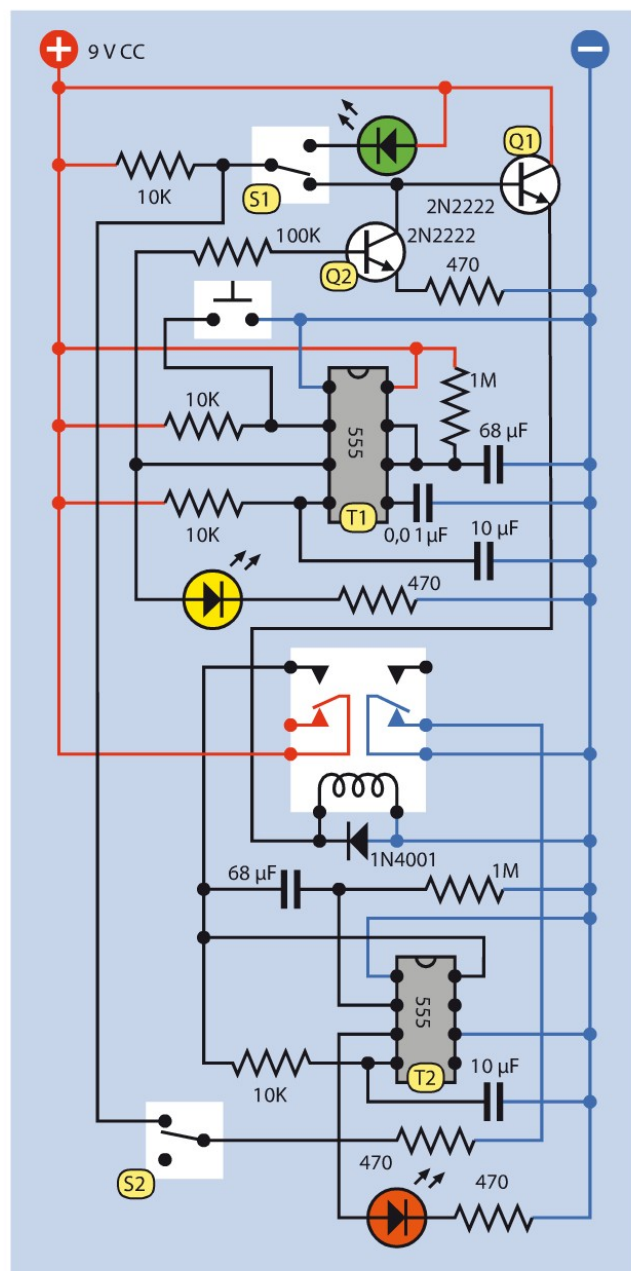


Figure 4-46. Schéma équivalent du circuit du système d'alarme.

Comment générer une alerte sonore ?

Si vous souhaitez que le système d'alarme génère une alerte sonore, vous devrez remplacer la LED rouge utilisée pour les tests par un dispositif sonore ou un circuit produisant une sortie audio.

Une solution simple consiste à utiliser un dispositif sonore proposé en boutique. Il existe des centaines de

sirènes disponibles à faible coût, destinées à émettre un son désagréable quand on les met sous tension. Elles nécessitent généralement une alimentation de 12 V CC, mais délivrent un son presque aussi puissant sous 9 V CC. Rappelez-vous cependant que le temporisateur T2 ne peut pas délivrer un courant supérieur à 150 mA.

Si vous préférez un son produit par votre propre montage, vous pouvez incorporer le circuit de la figure 4-36. Utilisez la sortie de votre relais pour alimenter ce circuit ; vous disposerez alors de votre propre alerte sonore.

Et comment gérer la mise en marche/arrêt ?

Vous avez testé le circuit en appliquant et déconnectant l'alimentation. Vous pouvez ajouter un interrupteur Veille/Arrêt, mais un clavier numérique codé serait préférable.

Pour l'instant, je ne peux pas vous montrer comment procéder, car nous n'avons pas encore abordé les circuits intégrés logiques. Nous réaliserons un tel clavier codé dans l'expérience 21.

Finalisation

Maintenant que le circuit d'alarme fonctionne, voyons comment le finaliser. Nous allons le souder sur une plaque perforée et le placer dans un boîtier pour le rendre présentable. Même si l'électronique reste ma principale préoccupation, il est important de terminer une expérience proprement : c'est pourquoi je vous propose ici plusieurs pistes.

La soudure d'un circuit peut être plus facile que la procédure suivie lors de l'expérience 14, où j'expliquais le câblage point par point.

Vous pouvez installer les composants sur une plaque perforée comportant des pistes de cuivre organisées selon la disposition des conducteurs internes d'une plaque de montage. Déplacez simplement les composants aux mêmes endroits sur la plaque perforée, puis soudez-les aux pistes de cuivre de l'autre face. Aucune soudure de fil à fil n'est alors nécessaire.

Repérez soigneusement la position d'un composant sur votre plaque de montage, déplacez-le ensuite à la même position sur la plaque perforée, en introduisant ses broches dans les trous.

Retournez la plaque perforée, assurez-vous qu'elle est stable, puis examinez les trous par lesquels sortent les broches ou les fils (figure 4-47). Une trace de cuivre

entoure le trou et le relie à d'autres autres trous. Votre tâche consiste à faire fondre la soudure, afin qu'elle adhère simultanément au cuivre et au fil, en formant une liaison solide et durable entre eux.

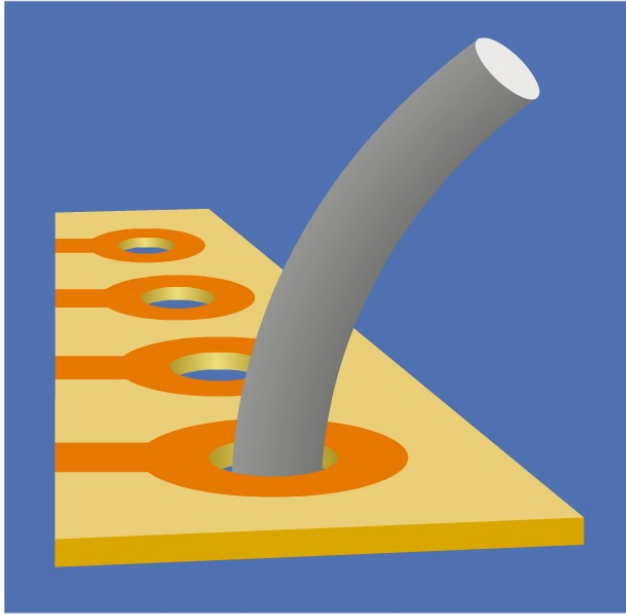


Figure 4-47. Face inférieure de la plaque perforée, montrant un fil ressortant d'un trou.

Fixez la plaque perforée ou maintenez-la sur une surface où elle ne pourra pas glisser facilement. Utilisez le fer à souder de faible puissance d'une main et tenez le fil de soudure de l'autre main. Appliquez la pointe du fer sur le fil et le cuivre, puis apportez à leur intersection un peu de soudure qui devrait fondre au bout de quelques secondes.

Déposez assez de soudure pour que se forme une petite goutte arrondie liant le fil et le cuivre (figure 4-48). Attendez que la soudure durcisse, saisissez le fil à l'aide de votre pince plate et remuez-le de façon à vous assurer qu'il est correctement fixé. Si tout est correct, coupez le fil qui dépasse avec votre pince coupante (figure 4-49).



Figure 4-48. Votre soudure devrait ressembler à celle-ci.

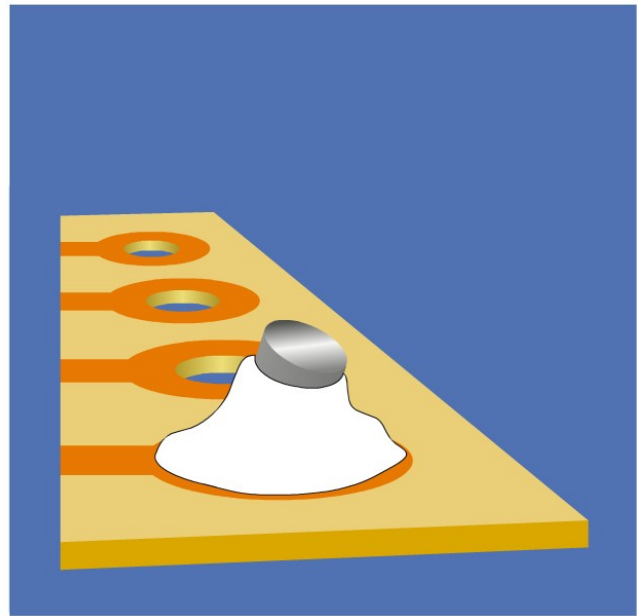


Figure 4-49. Après refroidissement, la soudure s'est solidifiée, vous pouvez couper l'excédent de fil.

Les étapes de la soudure des composants sur une plaque perforée sont illustrées sur les figures 4-50 et 4-51.

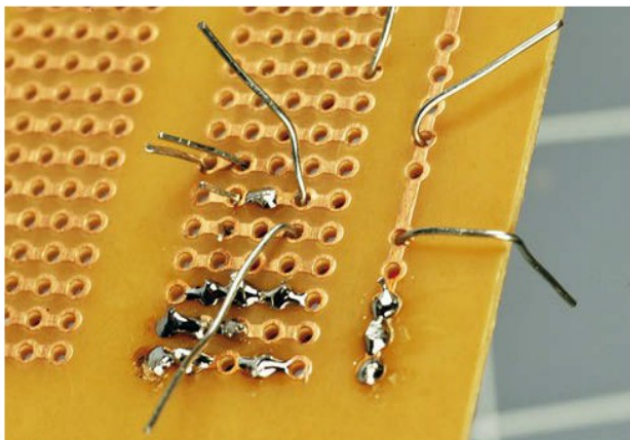


Figure 4-50. Cette photo a été prise durant le transfert des composants d'une plaque de montage à la plaque perforée. Les composants sont transférés par deux ou trois, puis leurs fils sont recourbés afin qu'ils ne s'échappent pas de la plaque perforée.



Figure 4-51. Après avoir été soudés, les fils sont coupés à ras, et les soudures sont examinées à l'aide d'une loupe. Deux ou trois autres composants peuvent maintenant être insérés et le processus se répète.

Les quatre erreurs les plus courantes de soudure sur plaque perforée

4. **Trop de soudure.** C'est important de savoir que la soudure se répand facilement sur la plaque, elle peut alors rejoindre une autre piste de cuivre et y adhérer (figure 4-52). Lorsque cela se produit, essayez d'absorber la soudure avec un kit de dessoudage, ou de l'éliminer avec un cutter. Si vous tentez de l'absorber avec une poire en caoutchouc ou une tresse à dessouder, il y aura toujours des résidus.

Même insignifiante, une trace de soudure peut créer un court-circuit. Vérifiez les liaisons avec une loupe en orientant la plaque afin que la lumière puisse l'éclairer sous différents angles.



Figure 4-52. Si vous déposez trop de soudure, elle aura tendance à se déposer là où vous ne le voulez pas.

5. **Pas assez de soudure.** Si la soudure est fine, le fil pourrait ne pas y adhérer durant le refroidissement. Une fissure microscopique suffit à empêcher le circuit de fonctionner. Dans certains cas extrêmes, la soudure adhère au fil et à la piste de cuivre, sans aucun contact (figure 4-53). Vous aurez des difficultés à repérer ce défaut si vous n'utilisez pas une loupe à fort grossissement.

Vous devez alors ajouter de la soudure là où il y en a trop peu, en prenant soin de chauffer correctement les endroits concernés.

6. **Composants mal placés.** Il est très fréquent de placer un composant dans le mauvais trou. Il arrive aussi d'oublier de créer une connexion. Je vous suggère d'imprimer le schéma et, à chaque fois qu'une connexion est établie sur la plaque perforée, barrez la liaison correspondante sur le schéma.

7. **Débris métalliques.** Lorsque vous coupez le surplus des fils, les petits fragments découpés peuvent se répandre autour de votre zone de travail. L'un d'entre eux peut se trouver piégé sous votre plaque et créer une liaison non souhaitée.

Nettoyez la face arrière de votre plaque perforée avec une vieille brosse à dents avant d'alimenter votre circuit. Plongez la brosse à dents dans de l'alcool afin de retirer les résidus de flux de soudure. Maintenez votre espace de travail le plus propre possible. Plus vous serez méticuleux, moins vous rencontrerez de problèmes. Une fois encore, vérifiez toutes vos soudures avec une loupe.

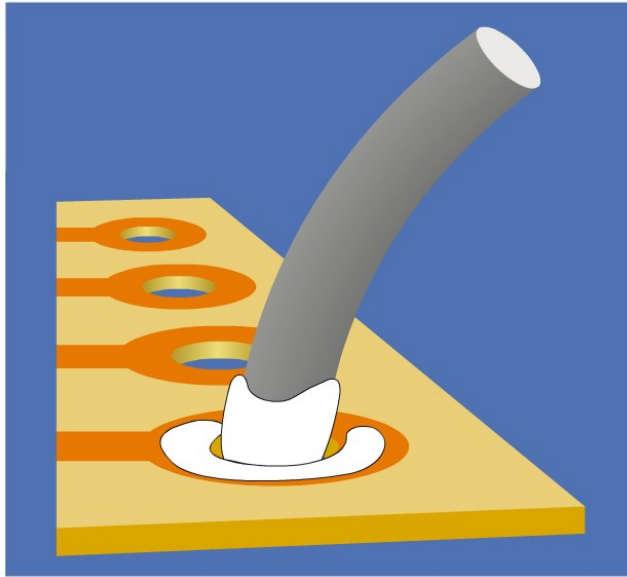


Figure 4-53. Trop peu de soudure ou un échauffement insuffisant peuvent laisser un fil séparé de la piste de cuivre d'une plaque perforée. Un espace, même insignifiant, est suffisant pour qu'une liaison ne soit pas établie.

Fondamentaux : recherche des erreurs sur les plaques perforées

Si votre circuit fonctionnait sur la plaque de montage, mais ne fonctionne plus sur la plaque perforée, la procédure de recherche des défauts est légèrement différente de celle que nous avons vue précédemment.

En premier lieu, vérifiez la position des composants ; c'est ce qu'il y a de plus facile à contrôler.

Si tous les composants sont correctement placés, tordez doucement la plaque lorsqu'elle est sous tension. Si vous obtenez un fonctionnement intermittent, c'est certainement une liaison soudée qui ne se fait pas correctement, ou un point de soudure qui présente une fissure.

Reliez ensuite le fil noir de votre multimètre au pôle négatif de l'alimentation, mettez sous tension, puis déplacez le fil rouge du multimètre en différents points du circuit, de haut en bas, en vérifiant la tension, tout en pliant doucement la plaque. Dans tout circuit, chaque point doit indiquer une tension. Si vous trouvez une zone morte, ou si votre multimètre indique une valeur irrégulière, vous devriez détecter un point de soudure défectueux, avec une tension nulle.

Une lampe de bureau puissante et une loupe sont indispensables pour suivre cette procédure. Un minuscule espace suffit pour empêcher votre circuit de fonctionner correctement. Sans grossissement, vous aurez beaucoup de difficultés à localiser un défaut et, même avec une loupe, l'incidence de la lumière doit être assez bonne pour y parvenir.

La saleté, l'eau ou la graisse peuvent empêcher une soudure d'adhérer correctement à un fil ou à une piste cuivrée. C'est une raison de plus pour adopter de bonnes habitudes de travail.

Le boîtier de votre projet

La façon la plus facile de loger votre circuit dans un boîtier consistera à utiliser un coffret pour montage. Des centaines de boîtiers sont disponibles. Ceux en aluminium ont un aspect professionnel, mais vous devrez isoler votre travail pour éviter les courts-circuits. Les boîtiers en plastique sont plus faciles à utiliser et sont aussi moins coûteux.

Ne percez pas des trous au hasard, pour les interrupteurs et les LED. Commencez par établir un plan sur papier, à l'aide d'un logiciel de dessin et imprimez votre plan. Vous devez disposer de suffisamment de place pour tous les éléments, en essayant de respecter leur position sur le schéma, afin de minimiser le risque de confusion.

Collez le dessin à l'intérieur du couvercle de votre boîtier (figure 4-54) et utilisez un objet pointu, poinçon ou aiguille, pour marquer le centre de chaque trou sur le plastique. Ce marquage vous aidera à centrer votre foret au moment de percer.



Figure 4-54. Un plan de positionnement des interrupteurs, LED et autres composants est collé sur la face interne du couvercle d'un coffret. Un poinçon est utilisé pour marquer les centres des trous à percer.

Si vous utilisez un circuit audio pilotant un haut-parleur, au lieu d'une sirène toute faite, vous devrez percer de multiples trous pour diffuser le son émis par le haut-parleur qui sera placé sous le couvercle (figure 4-55).

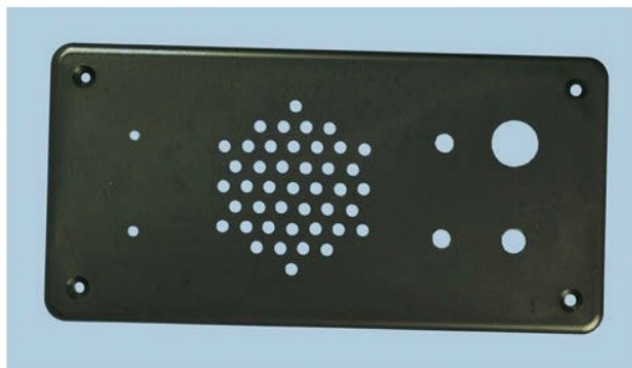


Figure 4-55. Vue extérieure du couvercle après perçage. Une petite perceuse sans-fil suffit à réaliser des trous bien finis, si le marquage est fait correctement.

Tous les interrupteurs et les LED sur le couvercle du coffret, qui devient ainsi la façade du système. La prise jack d'alimentation est localisée sur un des côtés du coffret. Chaque trou doit naturellement être dimensionné en fonction du composant qu'il reçoit. Avec un pied à coulisse, vous pourrez prendre les mesures et choisir le foret adéquat. Mieux vaut un trou trop large que trop petit. Un ébarboir convient parfaitement pour élargir légèrement un trou et l'ajuster au composant.

Si votre haut-parleur ne possède pas de trous de fixation, vous devrez le coller avec de la colle époxy rapide. Attention à ne pas en trop en mettre et qu'elle ne touche pas la membrane du haut-parleur.

Le perçage de trous de grand diamètre dans le plastique assez souple d'un coffret est délicat, car les forets ont tendance à creuser immodérément le plastique. Pour remédier à ce problème, voici trois possibilités :

- Utilisez des mèches à façonner Forstner ou une scie à cloche pour créer des perçages très nets.
- Percez une série de trous de diamètres croissants.
- Pratiquez un trou plus petit que le diamètre nécessaire et agrandissez-le avec un outil à ébavurer.

Quelle que soit l'approche retenue, vous devrez fixer le couvercle du coffret, sa face extérieure orientée vers le bas, sur un morceau de bois. Le perçage s'effectuera alors de l'intérieur du couvercle, le foret traversant le plastique, puis pénétrant dans le bois.

Pour terminer, installez les composants sur le couvercle (figure 4-56), puis portez votre attention sur la face interne de ce panneau de contrôle.

Soudure des interrupteurs

Vous devez d'abord déterminer le contact correspondant à la position haute de l'interrupteur. Utilisez votre multimètre, pour savoir quelles bornes sont reliées lorsque l'interrupteur est activé. Vous pourriez, par exemple, décider que l'interrupteur est en position ON, pour enclencher l'alarme. La figure 4-56 montre la face interne de mon panneau de contrôle, avec un interrupteur SPDT, mais un interrupteur SPST convient très bien pour le projet.



Figure 4-56. Les composants ont été ajoutés au panneau de contrôle du coffret (vu de l'intérieur). Le haut-parleur a été collé et le reste de la colle répandu autour des LED.

Rappelez-vous que la broche centrale des interrupteurs bidirectionnels est presque toujours le pôle de l'inverseur.

Des fils souples conviennent pour relier la plaque perforée du circuit au panneau de contrôle, car ils se plient facilement et imposent des efforts moins importants aux points de soudure. En torsadant chaque paire de fils ensemble, le désordre du câblage est minimisé.

Lorsque vous connectez des fils ou des composants aux broches des interrupteurs, le fer à souder de faible puissance pourrait ne pas fournir assez de chaleur pour obtenir des soudures correctes. Vous pouvez donc utiliser un fer de plus forte puissance pour ces soudures, mais vous devez absolument utiliser un bon dissipateur de chaleur pour protéger les LED quand vous les soudez et ne pas laisser le fer en contact pendant plus de 10 s avec les composants. Cela pourrait faire fondre les isolants et même endommager les parties internes des interrupteurs.

Dans le cas de projets plus complexes, le panneau de contrôle et la plaque du circuit devront être reliés de façon plus simple. Un câble ruban multicolore munis de connecteurs est idéal pour le relier à la plaque du circuit. Pour des projets d'étude, les fils peuvent rester en désordre (figure 4-57).

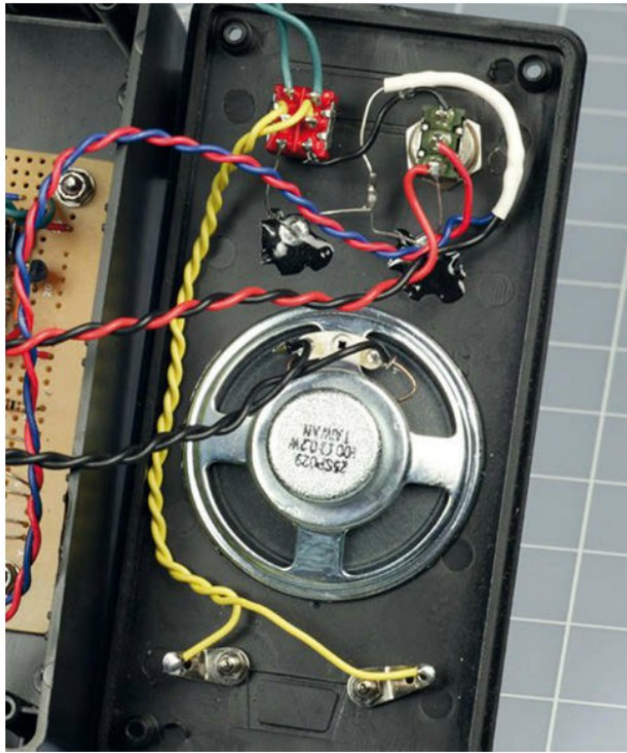


Figure 4-57. Des fils torsadés par paire sont reliés point à point, sans trop de considération pour la clarté du câblage, ce projet étant relativement petit.

Fixation de la plaque perforée

La plaque du circuit sera installée au fond du boîtier, maintenue par quatre boulons de 3 mm, munis de rondelles et d'écrous autobloquants. Les boulons sont préférables à la

colle, pour éventuellement démonter le circuit, s'il nécessite une réparation. Utilisez des écrous autobloquants pour éliminer le risque d'un court-circuit dû à une chute d'écrou sur un composant.

Coupez la plaque du circuit de façon à ce qu'elle puisse entrer dans le coffret, en prenant soin de ne pas endommager les composants. Pour cela utilisez une scie à ruban ou une scie à métaux. Rappelez-vous que les plaques contiennent souvent des fibres de verre qui peuvent endommager une scie à bois.

Vérifiez sous la plaque que des fragments des pistes de cuivre découpées ne restent pas coincés.

Percez les trous pour les boulons dans la plaque, en prenant à nouveau soin de ne pas endommager les composants. Marquez ensuite l'emplacement des trous au fond du coffret et percez. Fraisez les trous à l'extérieur du coffret, afin que les vis à tête fraisée utilisées affleurent la surface. Introduisez les boulons par le fond du coffret et installez la plaque du circuit. Inutile de serrer trop fort les écrous autobloquants, il est même conseillé de ne pas les bloquer.

Après avoir installé la plaque du circuit, testez à nouveau son fonctionnement, par sécurité.



Évitez les contraintes mécaniques sur la plaque

Ne serrez pas trop fort la plaque du circuit à l'intérieur du coffret. Cela pourrait imposer des contraintes aux soudures et aux pistes de cuivre, qui risqueraient de se rompre.

Test final

Lorsque vous aurez terminé le circuit, si vous n'avez pas encore installé votre réseau de capteurs, utilisez un morceau de fil à la place. Par commodité, j'ai utilisé des *bornes de connexions* sur mon coffret. Vous pouvez aussi relier une paire de fils à la plaque du circuit et les faire sortir du coffret par un petit trou. Si tout fonctionne comme prévu, il est temps de fixer le couvercle, en maintenant les fils à l'intérieur (figure 4-58). Le coffret est suffisamment grand pour que les parties métalliques n'entrent pas en contact accidentellement, mais il convient de rester prudent.



Figure 4-58. Le système d'alarme terminé.

Installation de l'alarme

Avant d'installer les capteurs magnétiques, vous devrez les vérifier un par un en approchant le module aimant du module de contact, puis en les éloignant, tout en utilisant votre multimètre pour vérifier la continuité entre ces contacts. L'interrupteur devrait se fermer lorsque les deux modules sont rapprochés puis s'ouvrir quand l'aimant est éloigné.

Dessinez un plan de l'installation montrant la façon dont vous entendez relier les capteurs entre eux. Rappelez-vous qu'ils doivent être reliés en série, et non en parallèle (figure 4-59). Les deux points de connexion sur le dessin (en vert) représentent les bornes placées sur le couvercle du coffret, les rectangles en rouge foncé sont les contacts des capteurs magnétiques, installés sur les portes et les fenêtres. Comme le câble de ce type d'installation comporte généralement deux fils, vous pouvez le disposer comme indiqué sur la figure 4-59, mais coupez-le et soudez-le pour créer deux branches. Les points de soudure sont représentés en orange. Observez la façon

dont le courant circule à travers les capteurs, avant de retourner au coffret du système.

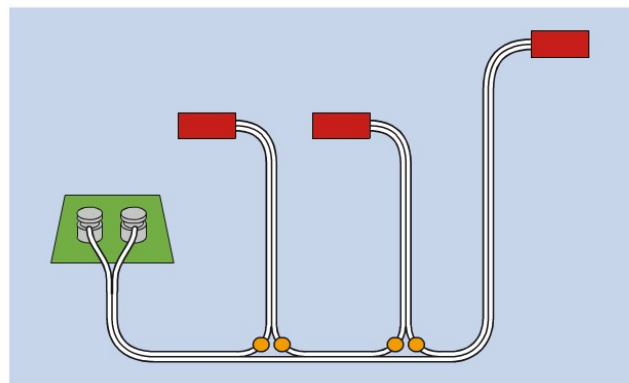


Figure 4-59. Un câble blanc à double conducteur peut être utilisé pour relier les bornes du boîtier de l'alarme aux capteurs magnétiques (en rouge). Comme les capteurs doivent être montés en série, le fil est coupé et soudé aux points de jonction repérés par un cercle orange.

Le même réseau est représenté sur la figure 4-60, montrant l'installation telle qu'elle pourrait être réalisée dans un local ayant deux fenêtres et une porte.

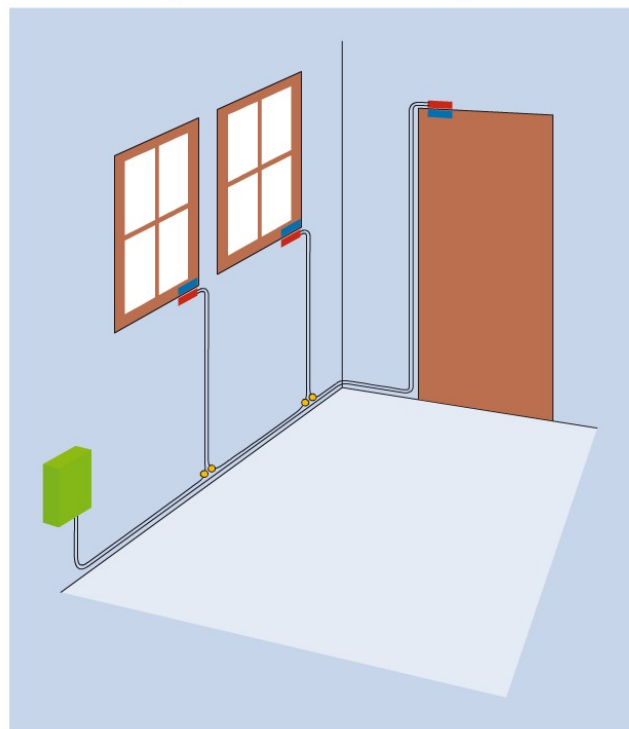


Figure 4-60. Dans une installation comprenant deux fenêtres et une porte, les composants magnétiques des détecteurs (rectangles bleus) peuvent être disposés comme illustré. Les interrupteurs (en rouge) sont placés à côté.

Vous aurez évidemment besoin d'une grande quantité de câble. Le câble blanc à fils torsadés vendu pour l'installation d'une sonnette ou d'un thermostat d'ambiance conviendra parfaitement. C'est un câble généralement muni de fils de jauge AWG 20 ou plus gros.

Après avoir installé l'ensemble des capteurs, connectez votre multimètre aux fils qui devront être reliés au coffret de l'alarme afin de tester la continuité, puis ouvrez une par une les fenêtres et la porte, afin de vérifier que chaque capteur fonctionne. Lorsque tout est correct, reliez les fils du réseau aux bornes de votre boîtier.

Préparons maintenant l'alimentation. Utilisez un adaptateur secteur de 9 V CC équipé de la prise jack d'alimentation, ou un connecteur relié à une pile de 9 V. Le circuit peut également être alimenté par une batterie de système d'alarme de 12 V, mais le relais de 9 V devra être remplacé par un relais de 12 V CC.

Il ne vous reste plus qu'à étiqueter l'interrupteur, le bouton-poussoir, le connecteur d'alimentation et les bornes de connexion de votre boîtier. L'interrupteur sert à tester le réseau de capteurs, le bouton-poussoir met l'alarme en veille et vous octroie un délai d'une minute pour quitter la pièce avant que le système ne se déclenche. Vous pouvez être amené à demander à une autre personne d'utiliser votre système en votre absence ou vous pourriez même oublier ces détails après quelques mois ou années. C'est la raison pour laquelle il est bon d'identifier les éléments du panneau de contrôle.

Conclusion

Ce projet d'alarme vous a permis de suivre les étapes habituelles du cycle de développement d'un système :

- Établir une liste des besoins (cahier des charges).
- Choisir les composants appropriés.
- Dessiner un schéma et bien le comprendre.
- Le modifier pour l'adapter à sa réalisation sur une plaque de montage.
- Installer les composants sur une platine de montage et tester les fonctions de base.
- Modifier ou améliorer le circuit et le tester à nouveau.
- Ajouter des interrupteurs, des boutons-poussoir, un connecteur d'alimentation et des bornes de connexion pour relier le circuit aux éléments externes.
- Installer l'ensemble dans un coffret et étiqueter les éléments.

Expérience 19 : testeur de réflexes

Comme le temporisateur 555 est capable d'exécuter des milliers de cycles par seconde, il peut très bien servir à évaluer les réflexes d'un individu. Vous pourrez ainsi le tester avec vos amis pour voir lequel d'entre vous réagit le plus vite et vous pourrez constater les variations de vos réflexes, selon votre humeur ou la qualité de votre sommeil la nuit précédente.

Le circuit n'est pas très compliqué, mais il nécessite beaucoup de câblage et tiendra tout juste sur une platine de 60 rangées de trous ou plus. Il pourra être testé par sections, comme celui de l'expérience 18. Sans commettre d'erreurs, l'ensemble du projet peut être terminé en deux heures.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 3 circuits intégrés 4026B
- 3 circuits intégrés temporisateurs 555
- 2 résistances de 470 Ω , 3 de 680 Ω , 6 de 10K, 1 de 47K, 1 de 100K et 1 de 330K
- 2 condensateurs de 0,01 μ F, 1 de 0,047 μ F, 1 de 0,1 μ F, 1 de 3,3 μ F, 1 de 22 μ F et 1 de 100 μ F
- 3 interrupteurs tactiles
- 1 LED générique rouge et 1 jaune
- 1 potentiomètre ajustable de 20 ou 25K
- 3 afficheurs numériques à LED à un chiffre, de hauteur 14,22 mm (0,56 pouce), de couleur rouge et à faible consommation, capables de fonctionner sous 2 V et 5 mA (Avago HDSP-513A de préférence, ou Lite-On LTS-546AWC, ou Kingbright SC56-11EWA, ou similaire)

Attention : protection électrostatique des circuits intégrés

Le temporisateur 555 est assez résistant, mais dans cette expérience vous allez utiliser un circuit intégré CMOS (le 4026B), qui est plus sensible à l'électricité statique.

Selon l'humidité ambiante, les chaussures que vous portez et le matériau de votre sol, vous pourriez détruire

le circuit intégré en le manipulant. Certaines personnes accumulent plus d'électricité statique que d'autres. Si vous présentez des risques en matière de décharges électrostatiques, vous le savez déjà car vous devez souvent ressentir des secousses désagréables en touchant une poignée de porte métallique ou un robinet.

Si vous pensez que vous devez protéger vos circuits intégrés de ce type de décharge, la meilleure façon est de vous relier vous-même à la terre. Pour cela, portez un bracelet antistatique, en matériau conducteur, attaché à votre poignet par un velcro et relié par une résistance de grande valeur (en général 1 M) à un objet métallique avec une pince crocodile.

Quand vous commandez des circuits intégrés, ils sont habituellement rangés dans des petits sachets en plastique conducteur ou dans une mousse conductrice. Le plastique ou la mousse protège les composants en assurant le maintien au même potentiel de toutes leurs broches. Si vous devez remballer vos circuits intégrés, vous pouvez les protéger en piquant leurs broches dans du papier d'aluminium.



Prudence avec la mise à la terre !

La résistance interne d'un bracelet antistatique vous protège de l'électrocution s'il vous arrive de toucher une source de tension élevée avec l'autre main. C'est une protection importante, car un choc électrique entre vos deux mains passe par votre poitrine et pourrait provoquer un arrêt cardiaque.

Démonstration rapide

Dans la présente édition, nous utiliserons trois afficheurs numériques à un chiffre, alors que dans la première j'employais un afficheur à trois chiffres. Le coût est légèrement supérieur mais le câblage s'en trouve simplifié et le projet est plus facile à mettre en œuvre. En outre, je pense que vous aurez plus de chance de trouver un afficheur à un chiffre qu'à trois dans les années à venir.

Je recommande des afficheurs de 14,22 mm de haut car ce sont des composants standards et leur brochage est également normalisé. Avec des afficheurs plus petits, leur brochage sera différent et les plus gros ne laisseront pas assez de place aux autres composants.

Commençons par découvrir l'afficheur et le circuit intégré 4026B qui va le piloter (figures 4-61 : plaque d'essai, 4-62 : schéma et 4-63 : valeur des composants).

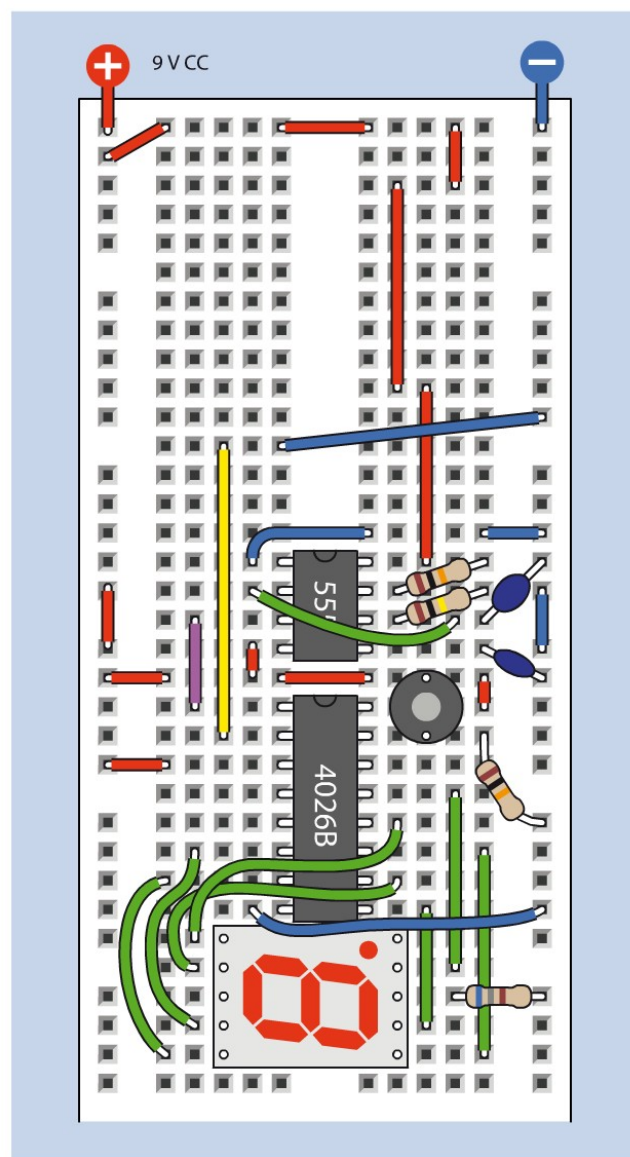


Figure 4-61. Premier module du testeur de réflexes. Un temporisateur commande un compteur pilotant un afficheur numérique.

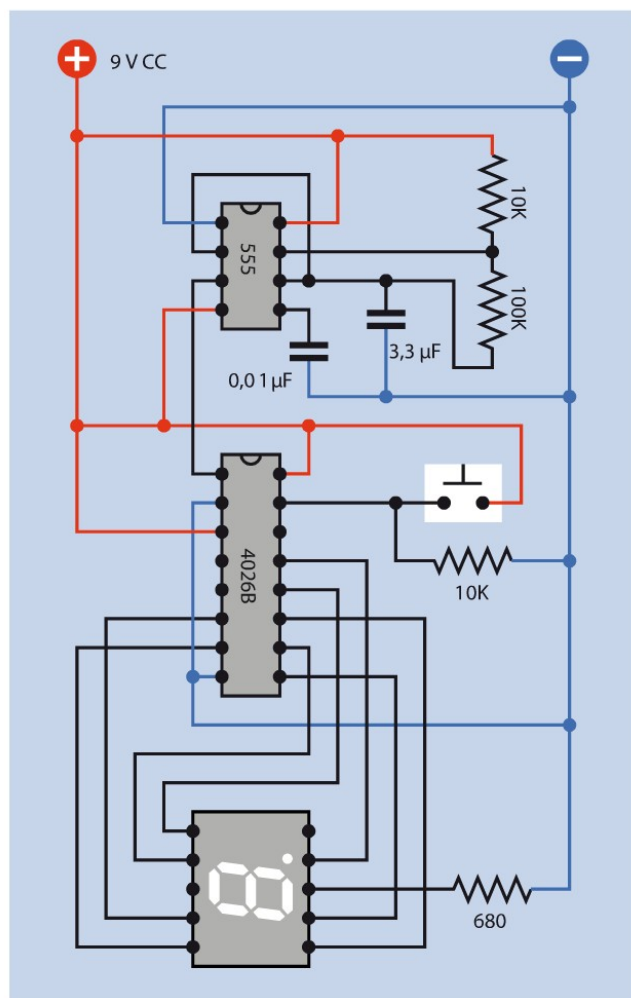


Figure 4-62. Schéma du premier module.

À la fin du projet, votre plaque de montage sera totalement remplie ; c'est pourquoi chaque composant doit être exactement positionné comme sur la figure. Comptez soigneusement les rangées de trous ! Certains fils n'ont pas encore de signification (les rouges). Ils serviront par la suite, lorsque vous ajouterez deux temporisateurs supplémentaires.

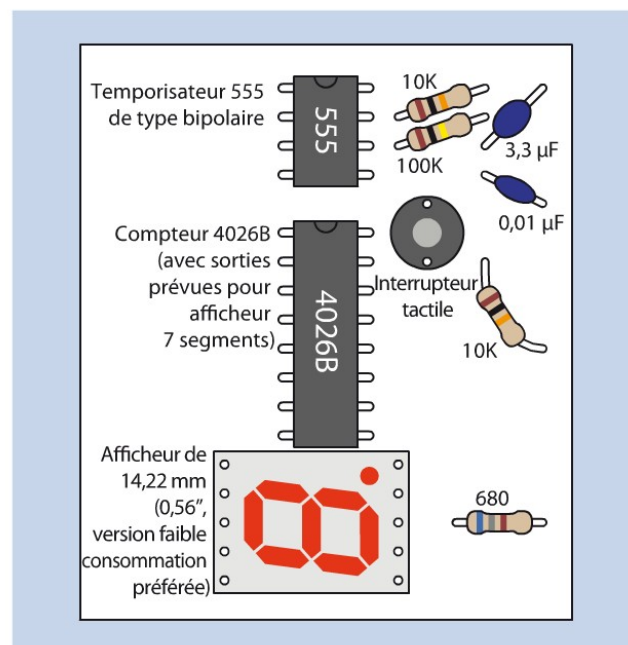


Figure 4-63. Valeurs des composants du premier module du circuit.

Mettez le circuit sous tension à l'aide d'une pile de 9 V ou d'un adaptateur secteur ; l'afficheur doit se mettre à compter de façon répétitive de 0 à 9.

Si vous ne voyez aucun chiffre, réglez votre multimètre pour la mesure de tension en volts, reliez le fil noir à la masse et vérifiez les tensions en divers points du circuit avec le fil rouge, par exemple la broche d'alimentation des circuits intégrés. Si la tension paraît normale, vérifiez que la résistance en bas et à droite est bien une résistance de 680 Ω, pas de 68K ou de 680K, qui ont des anneaux de couleurs approchantes.

Si l'afficheur indique des chiffres tronqués ou s'ils ne sont pas en ordre séquentiel, il y a probablement une erreur au niveau des fils verts qui le relient au circuit intégré 4026B.

Si l'afficheur indique la valeur 0 fixe, le temporisateur 555 n'est pas correctement câblé, ou il est mal relié au circuit intégré 4026B.

Quand vous obtiendrez un comptage correct, maintenez appuyé l'interrupteur tactile et vous constaterez qu'il force la remise à zéro du compteur. Dès que vous le relâchez, le compteur redémarre.

Nous disposons maintenant des bases d'un testeur de réflexes. Il nous suffira d'ajouter deux afficheurs supplémentaires, d'augmenter la vitesse de comptage et d'apporter quelques améliorations.

Fondamentaux : afficheurs à LED

Le terme LED peut prêter à confusion. Le composant que vous avez utilisé dans les expériences précédentes est plus connu sous le nom de *LED standard* ou *LED traversante* ou encore *voyant à LED* : c'est un petit composant rond possédant deux fils sortant de sa base. Il est devenu si courant qu'on l'appelle simplement « LED ». Cependant, les LED sont également utilisées dans d'autres composants, par exemple l'afficheur numérique présent sur votre plaque de montage. On l'appelle *afficheur à LED* et plus précisément, il s'agit d'un *afficheur numérique LED à sept segments*.

Les dimensions et la disposition des broches situées sous cet afficheur sont indiquées sur la figure 4-64. Les chiffres sont visualisés par sept segments et un point décimal et les espacements entre les broches sont des multiples de 2,54 mm (0,1 pouce), ce qui permet d'insérer l'afficheur sur une plaque de montage.

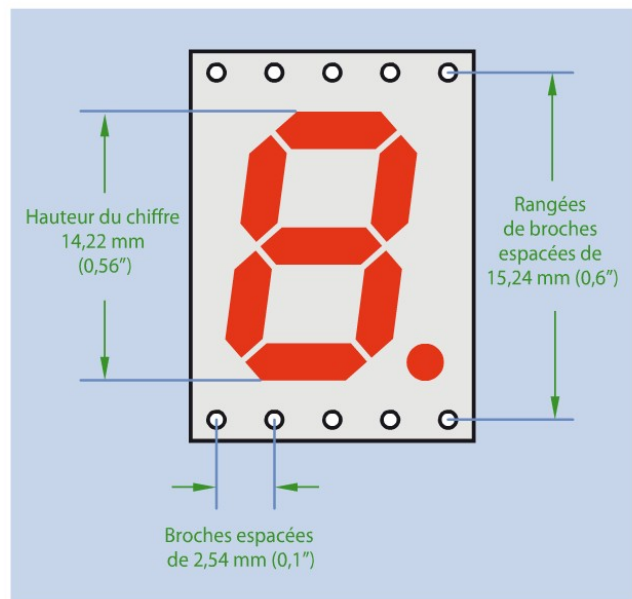


Figure 4-64. Dimensions et brochage d'un afficheur à sept segments standards.

La figure 4-65 montre les liaisons internes entre les broches et les segments de l'afficheur. Les broches 3 et 8 sont colorées en bleu, indiquant qu'elles doivent être reliées à la masse. Toutes les autres broches sont prévues

pour recevoir une tension positive qui active les segments LED. Ce type d'afficheur est dit à *cathode commune*, car les pôles négatifs des LED (cathodes), sont tous reliés ensemble.

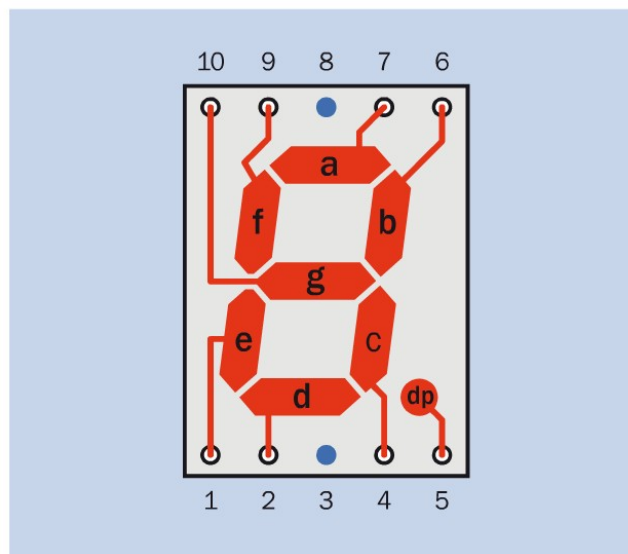


Figure 4-65. Configuration des liaisons internes du composant expliquant le brochage indiqué.

Dans un afficheur à *anode commune*, la situation est inverse : les segments sont activés individuellement par une tension négative et ils partagent une connexion positive interne. Choisissez le type d'afficheur qui convient le mieux à votre circuit ; toutefois, les afficheurs à cathode commune sont les plus utilisés.

Dans la plupart des fiches techniques, les segments sont repérés par les lettres *a* à *g*, et *dp* (ou *h* plus rarement) pour le point décimal.

Comme toutes les LED, les segments de l'afficheur doivent être protégés par une résistance en série, ce qui constitue une complication supplémentaire. La résistance n'est pas directement intégrée au circuit des afficheurs car ils sont prévus pour fonctionner dans une gamme étendue de tensions et que les valeurs des résistances en dépendent.

Pouvons-nous utiliser une seule résistance partagée par tous les segments, par exemple entre la broche 3 et la masse ? C'est possible, mais la résistance va faire chuter la tension et limiter le courant à un nombre de segments relatif au chiffre affiché. Ainsi, le chiffre 1 n'allume que deux segments, alors que le chiffre 8 allume l'ensemble des sept segments. C'est la raison pour laquelle certains chiffres seront plus lumineux que d'autres.

Pour notre expérience, nous allons privilégier la simplicité. Sur la figure 4-61, vous verrez que la résistance placée en bas et à droite, entre l'afficheur LED et le bus négatif, est de 680 Ω . Ce n'est pas la meilleure solution, mais cela permet de n'utiliser que 3 résistances de protection en série, au lieu de 21.

Fondamentaux : compteur décimal

Le circuit intégré 4026B est un *compteur décimal*, car il compte par dizaine. La plupart des compteurs ont une sortie codée, ce qui signifie que leur sortie présente les nombres en format binaire, que nous étudierons plus loin. Ce compteur fonctionne différemment : il possède sept sorties, dont les niveaux correspondent aux sept segments d'un afficheur. Alors que d'autres compteurs ont besoin d'un *pilote* pour convertir leurs sorties binaires en vue d'un affichage sur sept segments, le 4026B contient tout dans un seul boîtier.

C'est très pratique, mais le 4026B est un ancien circuit intégré CMOS qui fournit une puissance limitée. La fiche technique indique que chaque broche ne peut pas délivrer plus de 5 mA avec une alimentation de 9 V.

De façon pratique, il faut relier les sorties à un ensemble de transistors, pour les amplifier. Vous pouvez acheter un circuit intégré comprenant sept paires de transistors prévus pour cet usage, c'est le *réseau de transistors Darlington*. Pour utiliser le point décimal, il existe un autre réseau Darlington, avec huit paires de transistors.

Nous pourrions envisager d'utiliser trois réseaux de transistors Darlington pour piloter les trois afficheurs à LED de ce projet, mais il est beaucoup plus simple d'utiliser des afficheurs à faible consommation, directement pilotés par le compteur. Ils ne sont pas aussi lumineux, mais ils remplissent la fonction attendue. La résistance de 680 Ω limite le courant de chaque broche à 5 mA et impose une chute de tension de 2 V aux bornes des segments, qui variera, en fonction du nombre de segments allumés.

Fonctionnement interne d'un 4026B

Les compteurs sont des circuits intégrés avec quelques fonctionnalités intéressantes. La figure 4-66 montre le brochage de ce composant, où chaque broche est clairement identifiée par des indications telles que « vers le segment a ». Vous devez simplement les relier aux

broches appropriées de l'afficheur. Sur la figure 4-61, vous verrez que chaque fil vert relie les sorties du compteur aux entrées de l'afficheur.

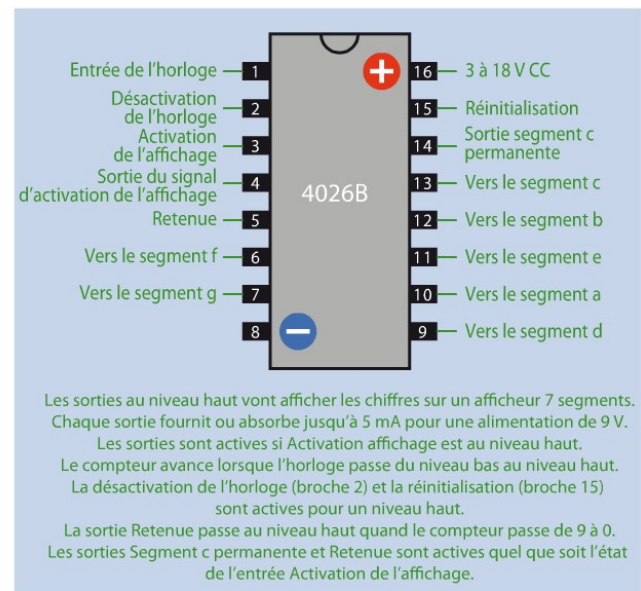


Figure 4-66. Brochage du compteur 4026B qui possède des sorties décodées permettant de piloter directement un afficheur LED à sept segments.

Les broches 8 et 16 du circuit intégré sont respectivement la masse et la tension d'alimentation. Les circuits intégrés logiques reçoivent en général leur alimentation de cette façon, aux broches des coins opposés, à l'exception du temporisateur 555, qui est considéré comme un circuit intégré analogique.

La figure 4-67 présente une vue simplifiée du compteur et de l'afficheur, ne montrant que les broches utilisées et les relations entre les broches de sortie et les broches de l'afficheur.

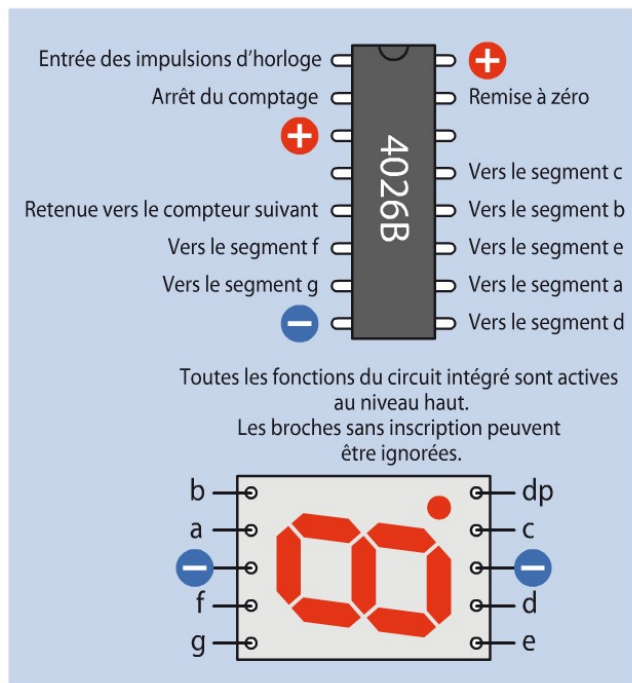


Figure 4-67. Vue simplifiée du compteur et de l'afficheur selon leur représentation sur la plaque de montage.

Observez la figure 4-61. Le bouton-poussoir, également appelé interrupteur tactile, est relié de façon à appliquer un niveau haut sur la broche 15 (réinitialisation) quand il est enfoncé. Cette tension traverse la plaque pour rejoindre le bouton-poussoir, par l'intermédiaire des fils rouges.

Si vous n'appuyez pas sur le poussoir, aucune tension n'est appliquée à la broche de réinitialisation du compteur. Cependant, une résistance de 10K relie cette broche au bus négatif de l'alimentation. Il s'agit d'une *résistance de rappel à la masse*. Elle applique une tension presque nulle sur cette broche, jusqu'à ce qu'on appuie sur le bouton-poussoir, ce qui force l'apparition d'un niveau haut. Rappelez-vous que si vous n'appliquez pas une tension définie sur chaque broche d'entrée d'un circuit intégré, un niveau indéterminé apparaît, provoquant un fonctionnement aléatoire et inexplicable. C'est une cause fréquente d'erreurs.

Voici d'autres petites choses à savoir sur le 4026B.

- Pour obtenir un niveau d'entrée haut, reliez la résistance de rappel au bus positif de l'alimentation, par l'intermédiaire d'une résistance de tirage de 10K. Quand vous devez la faire passer au niveau bas, utilisez un interrupteur qui éliminera l'effet de la résistance en reliant la broche directement à la masse.

- Pour que le niveau par défaut d'une entrée soit bas, reliez cette dernière au bus négatif de l'alimentation par l'intermédiaire d'une résistance de rappel de 10K. Quand vous devez la faire passer au niveau haut, utilisez un interrupteur qui éliminera l'effet de la résistance en reliant la broche directement au bus positif de l'alimentation.
- Toutes les entrées d'un compteur doivent être reliées d'une manière ou d'une autre. Ne laissez jamais de broche en l'air.
- Les broches de sortie inutilisées ne doivent pas être connectées.
- Parfois, un circuit intégré comporte une entrée dont nous n'avons pas besoin. Prenons l'exemple de la broche 3 du 4026B, inutile car je veux que les sorties soient actives en permanence. Elle est donc reliée directement au bus positif de l'alimentation, de façon permanente.

Cependant, si vous n'utilisez pas la broche d'entrée, elle doit avoir un niveau défini. Vous pouvez la relier directement au pôle positif ou négatif de l'alimentation.

Je vais maintenant vous présenter les autres fonctions du 4026B.

L'entrée horloge (broche 1) accepte une série d'impulsions hautes et basses. Le circuit intégré ne se soucie pas de leur durée. Il répond en ajoutant 1 à sa valeur, à chaque fois qu'il détecte une transition du niveau bas au niveau haut de l'horloge.

L'entrée désactivation de l'horloge (broche 2) indique au compteur qu'il doit ignorer l'entrée d'horloge. Comme toutes les autres entrées de ce circuit intégré, elle est active au niveau haut. Sur la plaque de montage, un fil bleu et un fil jaune maintiennent un niveau bas sur la broche 2 : autrement dit, l'action de cette broche est désactivée. Pour résumer :

- quand la broche de désactivation de l'horloge est au niveau haut, le compteur cesse de fonctionner ;
- quand cette broche est au niveau bas, elle permet au compteur de s'incrémenter.

L'entrée activation de l'affichage (broche 3) : voir plus haut.

La sortie d'activation affichage (broche 4) ne sera pas utilisée ici. Elle prend l'état de la broche 3 et le transmet à la broche 4 afin de propager ce signal à d'autres compteurs 4026B.

La sortie retenue (broche 5) est essentielle si vous voulez compter au-delà de 9. Elle passe du niveau bas au niveau haut quand le compteur est à 9 et passe à 0. Si vous reliez cette sortie à l'entrée horloge d'un second compteur 4026B, ce dernier va compter les dizaines. Sa sortie *retenue* peut alors être transmise à l'entrée horloge d'un troisième compteur, qui va compter les centaines. J'utiliserai cette possibilité à la fin de ce projet.

La broche 14 peut être utilisée pour réinitialiser le compteur après 0, 1 et 2. C'est une fonction utile pour une horloge digitale qui ne doit compter que 12 heures, mais dont nous n'avons pas besoin ; elle peut donc rester déconnectée.

Désormais, si vous rencontrez un circuit compteur, vous en comprendrez le fonctionnement simplement en consultant la fiche technique du fabricant. Vous pourrez ensuite le tester à l'aide de LED et d'interrupteurs tactiles, afin de vérifier vos connaissances.

Génération d'impulsions

Comme le 4026B, le temporisateur 555 tolère une tension d'alimentation comprise entre 5 et 12 V ; sa sortie, la broche 3, peut donc être directement reliée à l'entrée du 4026B. C'est le rôle du fil violet sur le plan de la plaque de montage. Le 555 fournit des impulsions qui sont comptées par le 4026B.

Le câblage périphérique du temporisateur devrait maintenant vous être familier. Vous constatez qu'il fonctionne en mode astable, mais il reste encore très lent. On ne va tout de même pas mesurer les réflexes d'une personne à un tel rythme !

En effet, mais pour ce démonstrateur, les nombres affichés ne doivent pas paraître incontrôlables. La vitesse de ce circuit sera augmentée plus loin.

Cahier des charges

Comment le testeur de réflexes doit-il fonctionner ? Voici la liste des besoins.

1. Un bouton-poussoir.
2. Après avoir appuyé sur le bouton, intervient un laps de temps où rien ne se passe. Un signal visuel apparaît soudain, demandant au joueur de réagir.

3. Simultanément, le compteur démarre à partir de 000, à la vitesse de 1/1 000 s.
4. L'utilisateur doit appuyer sur un autre bouton pour arrêter le compteur.
5. Le compteur se fige, indiquant le temps écoulé entre le signal de départ et l'arrêt. Cela évalue les réflexes de l'utilisateur.
6. Un bouton de réinitialisation remet le compteur à 000.

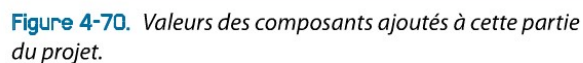
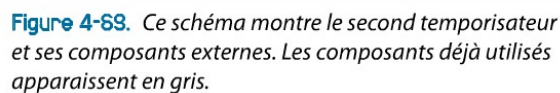
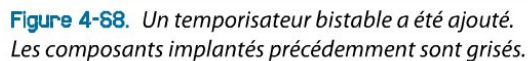
Vous avez déjà installé sur votre plaque de montage le bouton de réinitialisation, mais en plus, il faut un bouton-poussoir pour stopper le compteur.

La broche de désactivation de l'horloge va figer l'affichage, mais pour qu'il le reste, un niveau haut doit demeurer appliqué sur cette broche. En d'autres termes, il va falloir verrouiller cette commande, ce que nous mettrons en œuvre à l'aide d'un autre temporisateur 555, câblé en mode bistable.

Système de contrôle

Sur la figure 4-68, le 555 bistable a été ajouté ainsi que deux nouveaux boutons-poussoir. Le fil bleu en diagonale de la figure 4-61 a été retiré afin de libérer de la place pour le nouveau temporisateur. Les composants déjà installés apparaissent en grisé.

La figure 4-69 montre le circuit sous forme schématique et les valeurs des composants ajoutés sont indiquées sur la figure 4-70.



Après avoir réalisé cette nouvelle partie du circuit, passons au test. Vous devriez constater que les deux nouveaux boutons provoquent le départ et l'arrêt du compteur.

Lorsque vous appuyez sur le bouton de départ, il met à la masse la broche de réinitialisation du 555 bistable. La sortie sur la broche 3 du temporisateur passe au niveau bas et elle est reliée à l'entrée de désactivation de l'horloge du compteur. Un niveau *bas* sur cette entrée signifie que l'horloge *n'est pas* désactivée. Le compteur commence donc à compter. Et il continue de le faire car, lorsque le 555 bistable est déclenché, sa sortie est verrouillée et conserve son état indéfiniment.

Appuyez sur le bouton d'arrêt. Cela met à la masse l'entrée du 555 bistable, ce qui le déclenche. Sa sortie passe alors au niveau haut et, comme il fonctionne en mode bistable, elle est verrouillée et demeure stable indéfiniment. Cela a pour effet de désactiver l'horloge, ce qui stoppe le compteur.

Quand vous appuyez sur le bouton en bas à droite, le compteur est remis à 000. Cependant, le temporisateur reste verrouillé dans la position désactivant l'horloge jusqu'à ce que le bouton de départ soit enfoncé.

Le 555 en mode bistable correspond bien à ce dont nous avons besoin pour faire fonctionner ce circuit.

Résumons notre progression

Combien de points de notre liste de besoins avons-nous couvert ? Il me semble que nous avons presque terminé. Vous appuyez sur un bouton pour démarrer le circuit, sur un second bouton pour l'arrêter et, quand il est arrêté, un troisième poussoir le remet à zéro.

Il ne manque que l'effet de surprise. Comme il s'agit de mesurer la vitesse de ses réflexes, la personne qui utilise le circuit ne devrait pas savoir quand le compteur va démarrer.

Ajoutons un autre temporisateur, fonctionnant en mode monostable, qui va insérer un délai avant que l'action ne commence. De cette façon, le départ sera imprévisible.

Le délai

Commencez par retirer le bouton-poussoir de démarrage, ainsi que le morceau de fil bleu qui le relie au bus négatif. Laissez le fil jaune où il se trouve.

Ajoutez ensuite les nouveaux composants comme indiqué sur la figure 4-71. Le bouton de départ a été déplacé afin de déclencher l'entrée d'un troisième temporisateur, qui va introduire un délai préliminaire. La sortie de ce temporisateur passera au niveau haut pendant 5 à 10 s, puis, en passant au niveau bas, déclenchera le 555 bistable, faisant passer sa sortie au niveau bas afin de supprimer la désactivation de l'horloge du 4026B, qui commencera à compter.

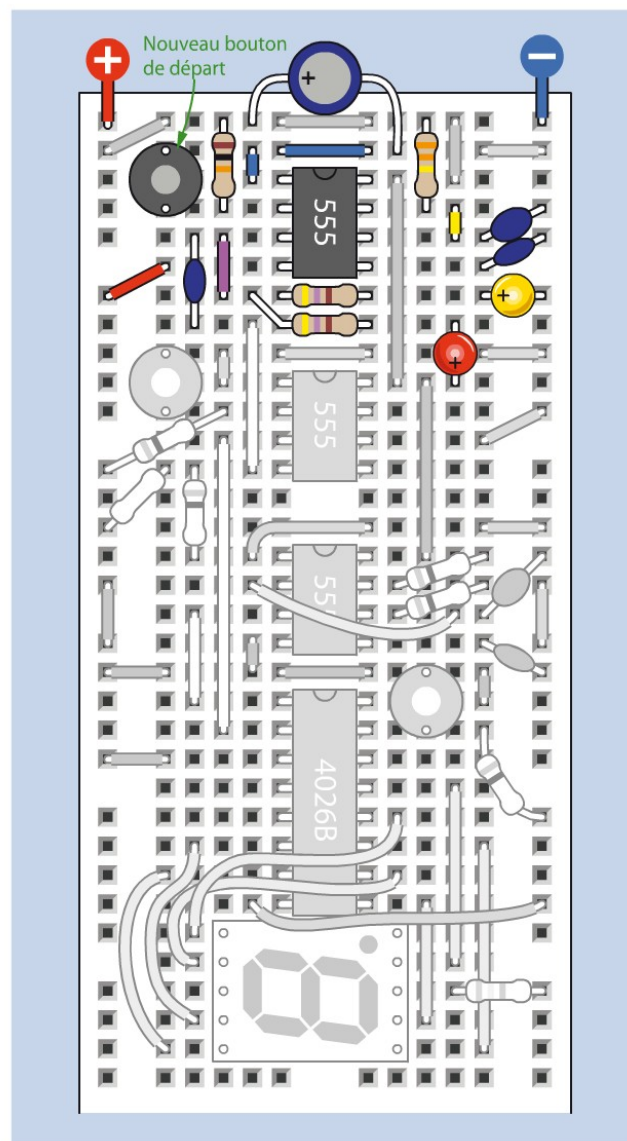


Figure 4-71. La partie supérieure du circuit du testeur de réflexes est maintenant terminée.

Faites attention lors de l'installation des LED rouge et jaune : la rouge est inversée par rapport au sens habituel, car elle est reliée à une source positive. Son fil le plus long se situe vers le bas et non vers le haut.

Le schéma de la nouvelle partie du circuit est représenté sur la figure 4-72.

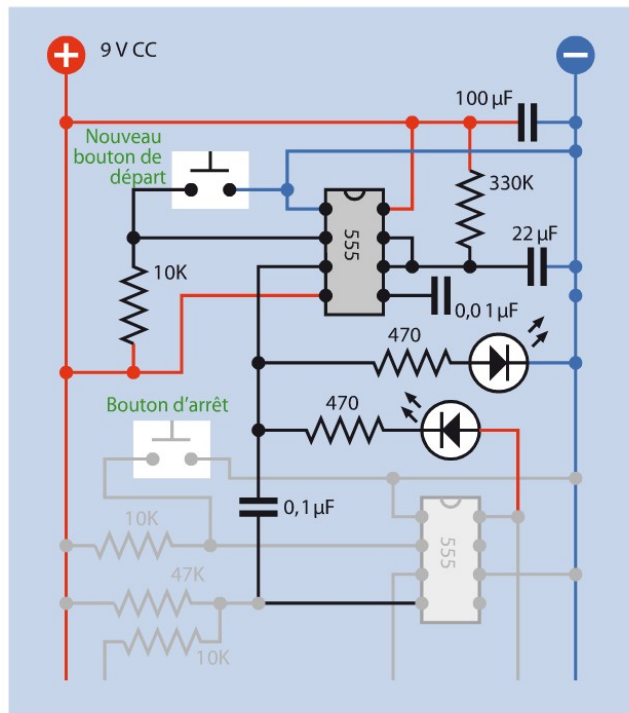


Figure 4-72. Schéma de la dernière partie ajoutée au circuit de contrôle.

Les valeurs des composants ajoutés à la plaque de montage sont indiquées sur la figure 4-73.

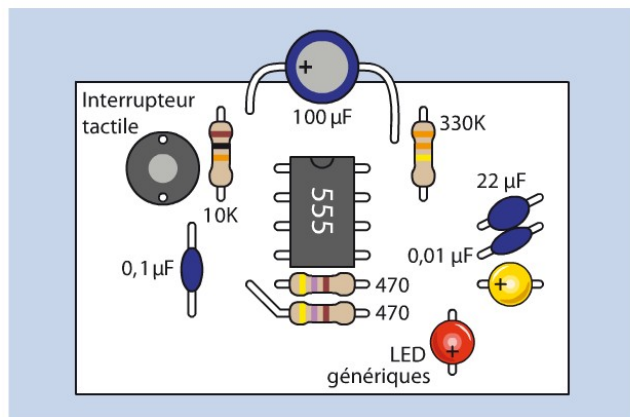


Figure 4-73. Valeurs des composants ajoutés à la plaque de montage.

Test du circuit

Lorsque la tension d'alimentation est appliquée à ce circuit, le compteur commence immédiatement à compter. C'est ennuyeux, mais il est assez facile d'y remédier. Appuyez sur le bouton d'arrêt, puis sur celui de remise à zéro. Vous êtes maintenant prêt pour l'action.

Appuyez sur le nouveau bouton de départ, afin de générer un délai initial. Durant cette période, la LED jaune est allumée. Le délai s'écoule pendant environ sept secondes, après quoi la LED jaune s'éteint et la LED rouge s'allume. Simultanément, le compteur commence à compter jusqu'à ce que vous appuyiez sur le bouton d'arrêt.

Quant au condensateur de 100 µF en haut de la plaque, il remplit une fonction importante lui aussi. Le 555 a la mauvaise habitude de créer des pics de tension parasites lors du changement d'état de sa sortie et, dans ce circuit, ces parasites pourraient déclencher le second temporisateur, sans attendre la fin du délai. Le condensateur de 100 µF remédie à cela.

Toutes les fonctions sont en place, il ne reste plus qu'à accélérer le compteur existant et à ajouter deux autres compteurs pour traiter les fractions de seconde.

Comment ça marche ?

La figure 4-74 illustre la communication entre les différents composants.

Le bouton de départ (en haut, relié au temporisateur 3) force l'entrée du 555 au niveau bas et le déclenche.

La sortie du temporisateur 3 passe au niveau haut pendant environ 7 s. Cela crée le délai initial.

À la fin de ce délai, la sortie du temporisateur 3 repasse au niveau bas. Cette transition est transmise par le condensateur de couplage de 0,1 µF au temporisateur 2, qui fonctionne en mode bistable. Le condensateur ne transmet qu'une brève impulsion à la broche de réinitialisation du temporisateur 2, qui provoque le passage au niveau bas de sa sortie. Cette sortie basse est transmise à l'entrée de désactivation de l'horloge du compteur 4026B. Le niveau bas rend le compteur actif : le comptage est déclenché.

Attendons maintenant que l'utilisateur agisse. Il appuie sur le bouton d'arrêt relié à la broche 2 du temporisateur 2, dont la sortie passe au niveau haut sous l'effet de cette courte impulsion. Cela active l'entrée de désactivation du compteur et stoppe le comptage.

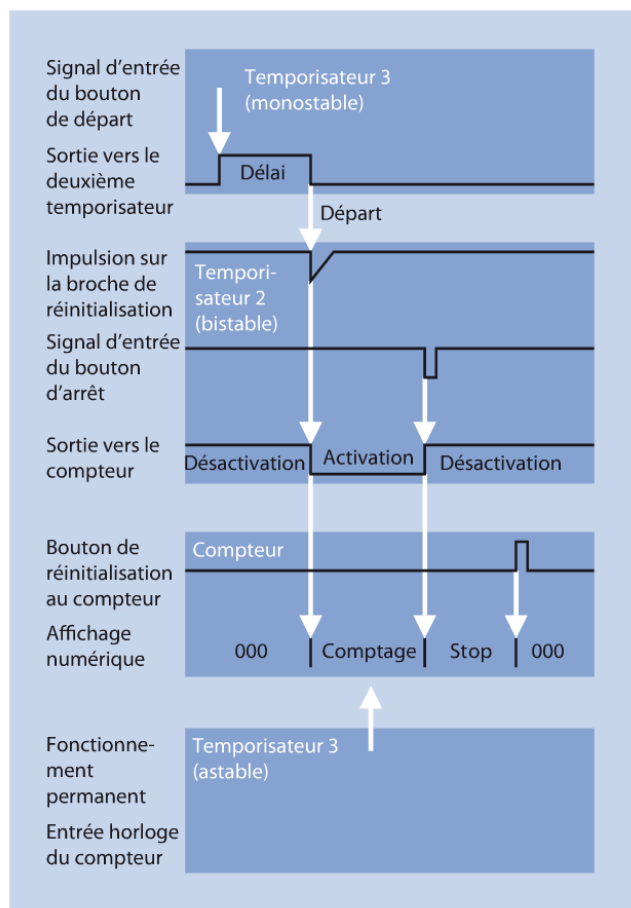


Figure 4-74. Interactions entre les composants du circuit de contrôle du temporisateur.

Historique : problèmes de développement

Lorsque j'ai réalisé le circuit original voici quelques années, il fonctionnait parfaitement. Quelques employés du magazine *Make* l'ont réalisé ; il fonctionnait toujours impeccablement. Cependant, nous savions que l'entrée de réinitialisation du 555 se comportait différemment selon le fabricant, malgré l'absence de documentation dans les fiches techniques.

Bien plus tard, j'ai appris que le circuit d'un lecteur fonctionnait de manière erratique et même parfois pas du tout. J'ai alors reconstruit le circuit en utilisant un oscilloscope, qui m'a révélé que le condensateur de couplage transmettait fidèlement l'impulsion du temporisateur 3 à l'entrée de réinitialisation du temporisateur 2, mais que, parfois, ce dernier ne répondait pas à cette impulsion.

Alors d'où venait le problème ? Soit l'impulsion était trop courte, soit son niveau n'était pas suffisamment bas. Dans un cas comme dans l'autre, il fallait diminuer la tension positive appliquée à la broche 4 du temporisateur 2 par la résistance de tirage. C'est pour cela que deux résistances sont reliées à la broche 4. Elles sont connectées en diviseur de tension, en maintenant une tension légèrement inférieure à 2 V à la broche 4. Cela est suffisant pour assurer son fonctionnement, et permet à la tension de réinitialisation d'atteindre un niveau plus bas et d'assurer une réinitialisation sans faille.

Le circuit actuel fonctionne correctement. Si vous rencontrez toujours des problèmes, essayez de modifier la tension appliquée à la broche 4 en jouant sur la valeur de la résistance (47K). Vous pouvez également essayer d'utiliser un condensateur de couplage de valeur supérieure. Et tenez-moi informé. Il est malheureusement impossible de prévoir toutes les différences de fabrication pouvant affecter les résultats.

Ajout de chiffres supplémentaires

L'ajout de deux chiffres est assez facile : pour chacun d'eux, un compteur 4026B sera mis en œuvre. Tous les compteurs et les afficheurs seront connectés de la même façon (figure 4-75).

Remarquez les fils violets à gauche de la plaque. Chacun d'eux relie la sortie de retenue d'un compteur à l'entrée horloge du compteur suivant.

Les fils jaunes en bas à droite, relient entre elles toutes les entrées de remise à zéro des compteurs ; ainsi, quand l'un d'eux est remis à zéro, ils le sont tous.

Des fils bleus ont été ajoutés à la broche 2 des compteurs 2 et 3. Rappelez-vous que la broche 2 est l'entrée de désactivation de l'horloge. Nous ne devons jamais arrêter les compteurs 2 et 3, puisque qu'ils sont sous contrôle du premier compteur. Quand celui-ci est arrêté, ils cessent également de compter.

N'oubliez pas d'appliquer la tension d'alimentation positive à la broche 16 (la broche d'alimentation) du second et du troisième compteur, en utilisant le fil rouge qui passe au-dessus de chacun des compteurs.

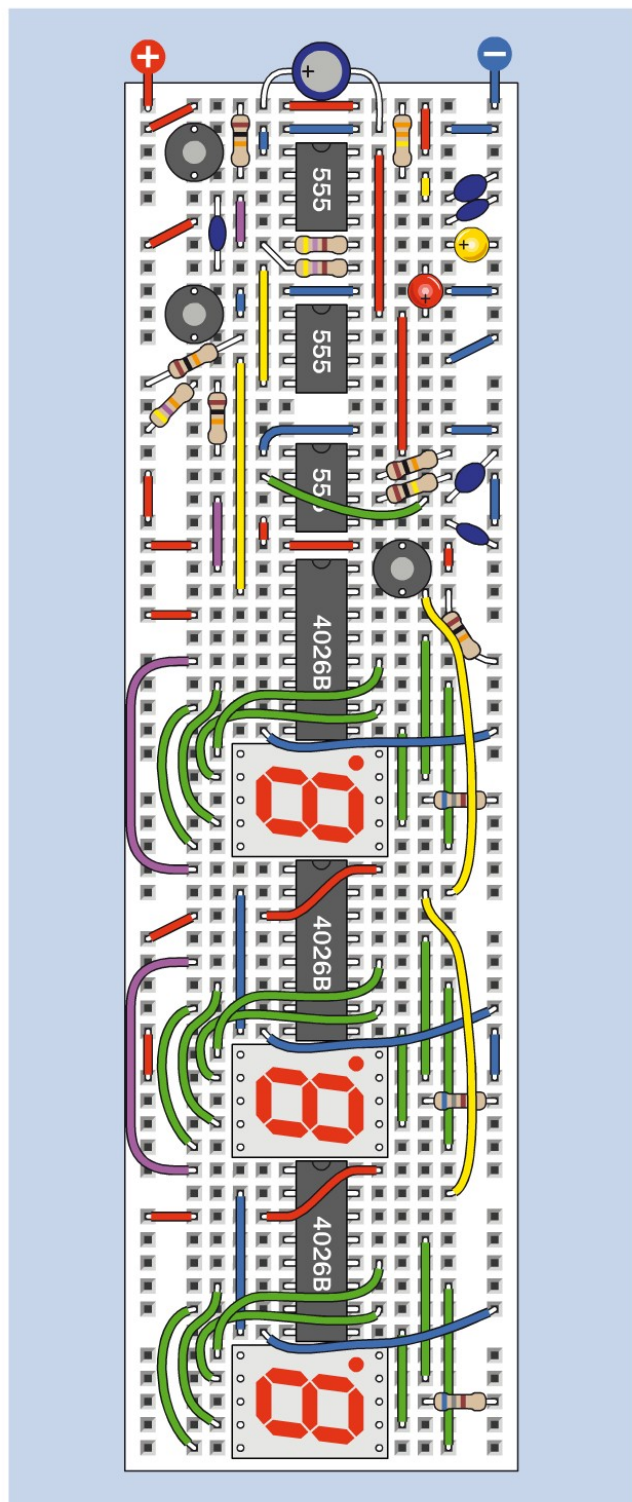


Figure 4-75. Le testeur de réflexes complet occupe tout l'espace sur une plaque de montage de 60 rangées.

Calibration

Comment faire en sorte que le circuit fonctionne à la bonne vitesse ?

Commencez par remplacer la résistance de 100K par une de 10K, sur le premier temporisateur installé, puis remplacez le condensateur de 3,3 μF par un de 47 nF. En théorie, cela permet de générer une fréquence de 1 023 Hz, très proche de la valeur souhaitée de 1 000 Hz.

Pour ajuster précisément la fréquence, remplacez la résistance de 10K du premier temporisateur par un potentiomètre ajustable. Le circuit est si compressé que c'est une manipulation difficile. La figure 4-76 vous montre une vue rapprochée de l'espace environnant le temporisateur le plus en bas.

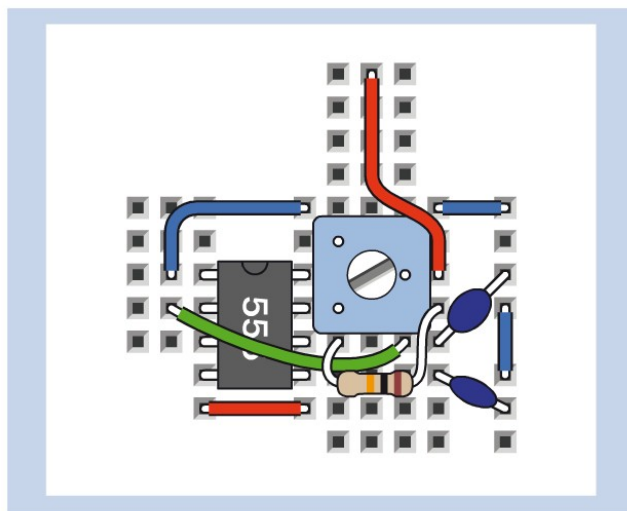


Figure 4-76. Comment loger un potentiomètre ajustable pour régler la fréquence de votre testeur de réflexes.

Commencez par déplacer les fils bleus d'une rangée. Faites cheminer le fil rouge vertical, à droite de l'emplacement du potentiomètre. Allongez le fil de la résistance de 10K, en prenant soin de ne pas le laisser en contact avec une autre connexion. Vous pouvez maintenant insérer le potentiomètre. La broche de son curseur est connectée au pôle positif de l'alimentation et une autre de ses broches est reliée à la broche 7 du temporisateur. Insérez la broche 3 dans une rangée qui n'est pas reliée.

Vous devez utiliser un potentiomètre de 20 ou 25K et commencer en le plaçant à mi-course. Vous avez maintenant trois possibilités pour parfaire le réglage de façon à ce que votre circuit fonctionne à 1 kHz.

Si vous avez un multimètre permettant la mesure des fréquences, connectez son fil noir à la masse et son fil

rouge à la broche 3 du premier temporisateur installé, puis ajustez le potentiomètre jusqu'à obtenir la mesure de 1 kHz sur le multimètre. Ce n'est pas plus compliqué !

Si votre multimètre ne permet pas la mesure des fréquences, vous pouvez utiliser un accordeur de guitare numérique. Reliez un haut-parleur à la sortie du 555 – en prévoyant un condensateur de couplage de 10 μF et une résistance de 47 Ω en série. L'accordeur vous indiquera la fréquence du son produit par le temporisateur.

Une autre méthode consiste à utiliser un minuteur indiquant les secondes. Quand le temporisateur fonctionne à 1 kHz, le second compteur sera incrémenté tous les 1/100 de seconde et le troisième compteur, tous les 1/10 de seconde et ainsi de suite, ce qui signifie qu'ils afficheront la valeur 0 toutes les secondes. Comme chaque chiffre reste allumé très peu de temps, il vous sera difficile de voir le moment précis où la valeur zéro est affichée. Voici comment procéder : masquez tous les segments de l'afficheur du bas, à l'exception du segment en bas et à droite. Ce dernier s'allume toujours sauf pour l'affichage du chiffre 2. Il sera ainsi plus facile de décompter les clignotements de ce segment que de reconnaître l'affichage des chiffres. Ajustez le potentiomètre et petit à petit, vous devriez parvenir à synchroniser l'afficheur du bas avec l'affichage du minuteur.

Améliorations possibles

À la fin d'un projet, il est intéressant de réfléchir aux possibilités de l'améliorer. Voici quelques suggestions :

- *Compteur arrêté à la mise sous tension.* Ce serait plus satisfaisant si le circuit était en mode « veille » plutôt qu'il ne se mette immédiatement à compter. Je vous laisse le soin d'y réfléchir.
- *Retour sonore quand la LED rouge s'allume.* Bien que non essentielle, ce serait une fonction pratique.
- *Délai aléatoire avant le début du comptage.* Il est très difficile de rendre aléatoire le comportement d'un circuit électronique, mais une méthode consisterait à demander à un utilisateur de placer le doigt sur une paire de contacts métalliques. La résistance de la peau déterminerait alors le délai, en fonction de la pression exercée par le doigt.

Et maintenant ?

Un compteur tel que le 4026B est un circuit intégré logique ; il contient des portes logiques qui permettent le comptage. Tous les ordinateurs fonctionnent selon ce principe.

La logique est si fondamentale en électronique que vous allez la découvrir en totale immersion dès l'expérience suivante. Les mots magiques sont AND, OR, NAND, NOR, XOR et XNOR (traduits par ET, OU, NON-ET, NON-OU, OU exclusif et NON-OU exclusif) vont vous faire découvrir un monde nouveau d'aventures numériques.

Expérience 20 : apprentissage de la logique

La compréhension du comportement de chacune des portes logiques élémentaires semble très facile. Il est en revanche beaucoup plus difficile de les associer entre elles. Je vais donc commencer par les décrire une par une.

Cette expérience comporte de nombreuses explications. Le but est de vous fournir un ensemble d'informations auxquelles vous pourrez vous reporter ultérieurement.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 interrupteur tactile SPDT (inverseur)
- 1 circuit intégré quadruple porte NAND (NON-ET) à deux entrées 74HC00
- 1 circuit intégré quadruple porte AND (ET) à deux entrées 74HC08
- 2 LED à faible consommation
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 régulateur de tension LM7805
- 1 résistance de 680 Ω , 1 de 2,2K et 2 de 10K
- 1 condensateur de 0,1 μF et 1 de 0,33 μF

Le régulateur de tension

Les portes logiques sont plus sensibles que le temporisateur 555 ou le compteur 4026B utilisés précédemment. Les circuits que nous allons utiliser exigent une tension d'alimentation précise égale à 5 V CC, sans fluctuations ni pics.

La façon la plus simple d'y parvenir consiste à installer un régulateur de tension LM7805 sur votre plaque de montage. Il délivre une tension régulée de 5 V quand on lui applique une tension supérieure ou égale à 7 V.

La figure 4-77 présente un régulateur et les fonctions de ses trois broches. Le schéma d'utilisation de ce composant est décrit sur la figure 4-78. La figure 4-79 montre une suggestion d'implantation du régulateur et de ses deux condensateurs, occupant un minimum de place en haut d'une plaque de montage. J'ai ajouté un petit interrupteur à glissière et une LED à faible courant indiquant la présence d'une tension d'alimentation (utile, en particulier lors de la recherche de panne d'un circuit). La valeur élevée (2,2K) de la résistance de protection de la LED permet de consommer un courant aussi faible que possible si vous utilisez une pile de 9 V comme alimentation.

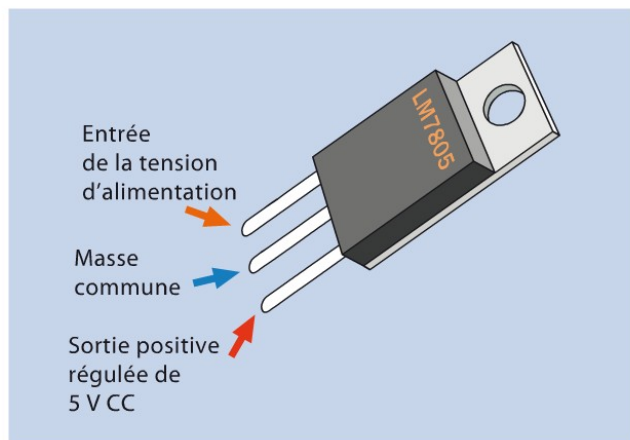


Figure 4-77. Fonction des broches d'un régulateur de tension LM7805 dont le dos métallique n'est pas face à vous.

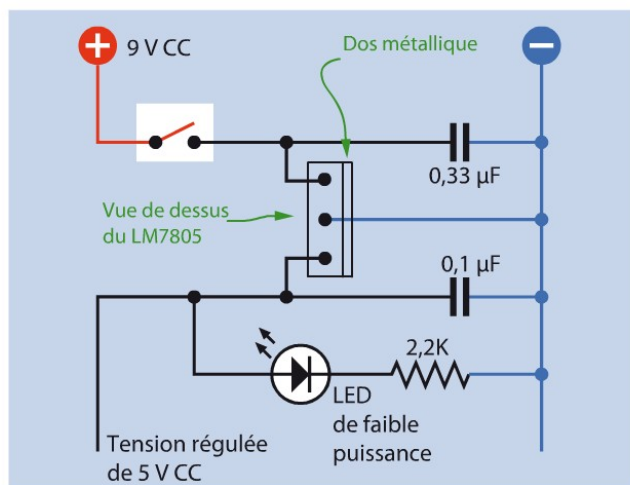


Figure 4-78. Schéma d'utilisation du régulateur LM7805. Les condensateurs sont indispensables.

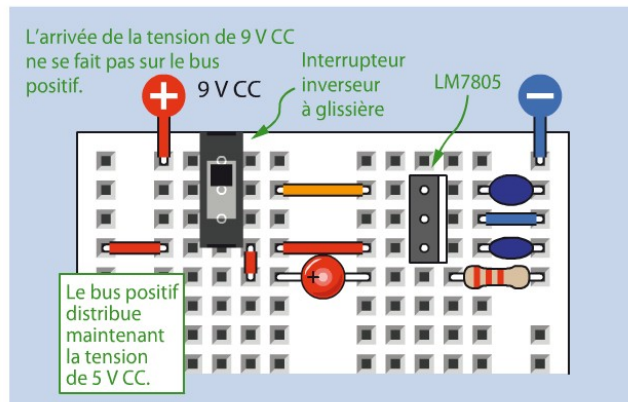


Figure 4-79. Montage d'un régulateur occupant un minimum de place sur une plaque d'essai et comportant un interrupteur à glissière et une LED à faible consommation indiquant la présence de la tension d'alimentation.

Attention : mauvaises utilisations du LM7805

CC, pas CA. Rappelez-vous que le LM7805 est un convertisseur CC en CC. Ne le confondez pas avec un adaptateur AC qui utilise la tension alternative d'une prise de courant et la convertit en tension continue. N'appliquez pas une tension alternative à l'entrée de votre régulateur de tension.

Intensité maximale. Le LM7805 régule parfaitement la tension et la maintient presque constante, quelle que soit l'intensité qu'il doit fournir, à condition de ne pas dépasser la limite d'utilisation. N'essayez pas d'utiliser une intensité supérieure à 1 A avec un régulateur LM7805.

Tension maximale. Bien que le régulateur de tension soit un composant semi-conducteur, il se comporte comme une résistance et dissipe de la chaleur en réduisant la tension délivrée. Plus la tension appliquée au régulateur est forte et plus l'intensité qui le traverse est élevée, plus la quantité de chaleur qu'il doit évacuer est importante. Théoriquement, vous pouvez appliquer une tension d'entrée allant jusqu'à 24 V CC et toujours obtenir une tension régulée de 5 V CC, mais cela ne serait pas raisonnable. Une tension d'entrée comprise entre 7 V CC et 12 V CC est préférable.

Tension minimale. Comme tous les composants à semi-conducteurs, un régulateur délivre une tension inférieure à sa tension d'alimentation. C'est pourquoi je vous recommande une tension au moins égale à 7 V CC.

Refroidissement. Le dos métallique est muni d'un trou au sommet, prévu pour l'évacuation de la chaleur. S'il est

vissé sur un support en aluminium, ce sera plus efficace, car ce matériau est connu pour être un bon conducteur de chaleur. Il existe de magnifiques dissipateurs thermiques, avec de multiples ailettes de refroidissement. Si vous ne prévoyez pas de faire passer un courant supérieur à 200 mA par le régulateur, il est inutile de prévoir un dissipateur de chaleur. Les circuits de ce livre consomment moins que cela.

Utilisation

Quand vous utilisez des circuits logiques alimentés sous 5 V CC, la tension régulée doit être disponible sur le bus positif de la plaque de montage. Remarquez que la tension d'entrée de 9 V du circuit n'est pas reliée au bus positif, mais à la broche supérieure du régulateur de tension. La sortie de 5 V régulée disponible sur la broche inférieure du régulateur est reliée au bus positif d'alimentation.

Le bus négatif de la plaque est commun au régulateur de tension et à l'alimentation externe. On parle souvent de « masse commune ».

Après avoir installé votre régulateur de tension, réglez votre multimètre pour la mesure de tension continue et vérifiez la tension entre les deux bus. Il est fréquent de détruire des circuits intégrés logiques à cause d'une tension incorrecte ou inversée.

La première porte logique

Maintenant qu'une tension de 5 V CC est disponible sur votre plaque d'essai, munissez-vous de 2 interrupteurs tactiles, 2 résistances de 10K, 1 LED à faible consommation et 1 résistance de 680 Ω , puis placez-les autour de votre circuit intégré 74HC00 (figure 4-80).

Vous constatez que plusieurs broches du circuit intégré sont reliées entre elles et à la masse. Nous verrons pour quoi un peu plus loin.

Quand vous reliez l'alimentation, la LED doit s'allumer. Appuyez sur un des interrupteurs tactiles, la LED doit rester allumée. Appuyez sur l'autre interrupteur, la LED est toujours allumée. Appuyez maintenant sur les deux interrupteurs, la LED doit s'éteindre.

Les broches 1 et 2 sont les entrées logiques du circuit intégré 74HC00. Elles sont maintenues à un niveau bas, car elles sont reliées à la masse par les résistances de 10K, mais chaque bouton force la tension d'une broche d'entrée au niveau de celle du bus d'alimentation.

- Lorsque l'entrée ou la sortie d'un circuit intégré logique alimenté sous 5 V CC est proche de 0 V CC, on dit qu'il s'agit d'un *niveau logique bas*.
- Quand une entrée ou une sortie d'un circuit intégré logique alimenté sous 5 V CC est proche de 5 V CC, on dit qu'il s'agit d'un *niveau logique haut*.

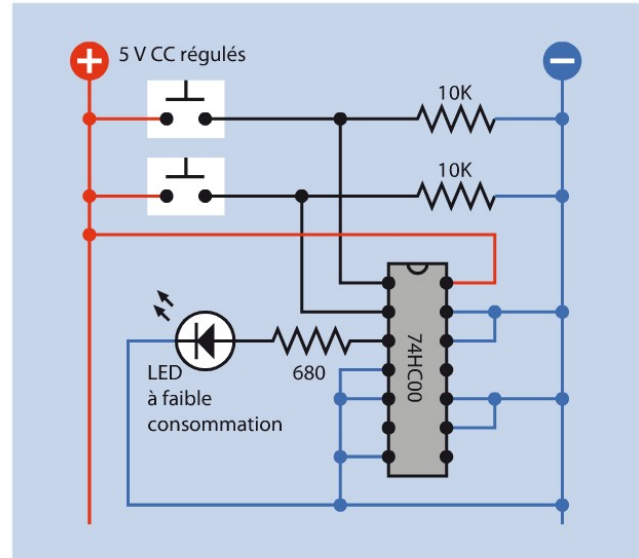


Figure 4-80. Démonstration du fonctionnement de la porte NON-ET (NAND).

La sortie logique d'un circuit intégré est normalement haute, mais *NON* si la première *ET* la seconde entrée sont au niveau haut. Le circuit réalisant une fonction *NON-ET* (*Not AND*), on dit qu'il contient une porte logique *NON-ET* (*NAND gate*).

Les portes logiques sont représentées par des symboles spéciaux utilisés dans des schémas appelés diagrammes logiques. Le diagramme logique correspondant au circuit de la figure 4-80 est représenté sur la figure 4-81, où l'objet en forme de U avec un petit cercle en bas est le symbole de la porte NON-ET (NAND). Aucune alimentation n'est représentée dans un diagramme logique mais, si vous vous reportez à la figure 4-80, le circuit intégré nécessite une alimentation reliée à la broche 7 (masse) et à la broche 14 (pôle positif). Ceci lui permet de fournir un courant plus important que son entrée n'en reçoit.

Chaque fois que vous voyez le symbole d'une porte logique, rappelez-vous que le circuit intégré nécessite d'être alimenté pour fonctionner.

Le circuit intégré 74HC00 contient quatre portes NON-ET (NAND) séparées, chacune possédant deux entrées et une sortie. Elles sont réparties selon le dessin de la partie droite de la figure 4-82. Comme une seule porte était nécessaire pour le test élémentaire précédent, les broches d'entrées des portes inutilisées étaient mises à la masse pour ne pas avoir un niveau flottant.

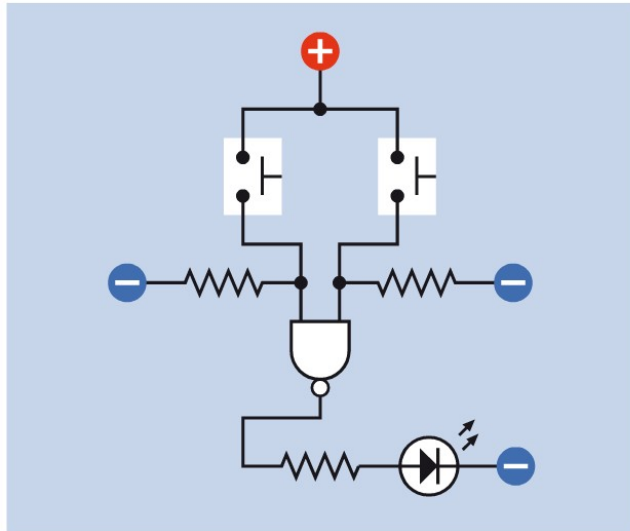


Figure 4-81. Un diagramme logique est plus simple à comprendre qu'un schéma contenant un circuit intégré logique.

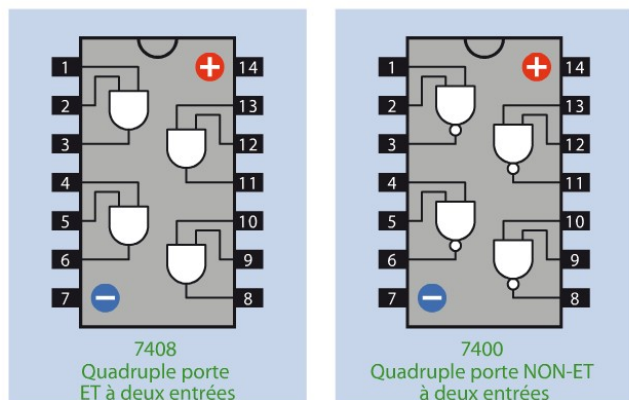


Figure 4-82. Disposition interne des portes de deux circuits intégrés logiques.

De nombreux circuits logiques sont interchangeables. Vérifions-le en commençant par déconnecter l'alimentation. Retirez avec précaution le 74HC00 et remplacez-le dans de la mousse conductrice (ou du papier aluminium, si vous n'avez pas de mousse). Remplacez-le par le circuit intégré 74HC08, muni de portes ET (AND). Assurez-vous de sa bonne orientation, son encoche repère vers le

haut. Reconnectez l'alimentation et utilisez les boutons-poussoir comme précédemment. Cette fois, vous devriez constater que la LED s'allume si la première entrée *ET* la seconde sont toutes deux positives, mais qu'elle reste éteinte dans les autres cas. Ainsi, la porte ET fonctionne à l'inverse de la porte NON-ET. Son brochage est représenté sur le dessin de gauche de la figure 4-82.

Ces circuits sont très utiles. On peut combiner des portes logiques dans des applications telles qu'une serrure électronique à combinaison, une paire de dés électroniques, ou une version électronique du jeu télévisé où des joueurs entrent en compétition pour répondre à une question. Si vous êtes très ambitieux, vous pourriez même réaliser un ordinateur complet à partir de portes logiques. Bill Buzbee, un amateur d'électronique, a réalisé un serveur web à partir de circuits intégrés logiques disponibles depuis longtemps (figure 4-83).



Figure 4-83. Cette carte-mère d'ordinateur, réalisée manuellement par Bill Buzbee, utilise des circuits intégrés logiques de la série 74xx et constitue la base d'un serveur web.

Historique : les origines de la logique

Mathématicien britannique né en 1815, George Boole inventa une branche entièrement nouvelle des mathématiques. Étrangement, celle-ci ne reposait pas sur les nombres. Boole, qui avait un esprit d'une logique redoutable, voulait réduire le monde à un ensemble d'états vrais ou faux qui s'interconnectent.

Les diagrammes de Venn, représentant graphiquement des relations logiques de ce type, ont été conçus aux alentours des années 1880 par John Venn. La figure 4-84 montre le diagramme le plus simple possible, dans lequel j'ai constitué un grand groupe – tous les êtres vivants – et

un sous-groupe – tous les êtres vivant en milieu aquatique. Le diagramme de Venn montre que tous les êtres vivant en milieu aquatique sont également des êtres vivants, mais que seule une partie de ces derniers vit dans l'eau.

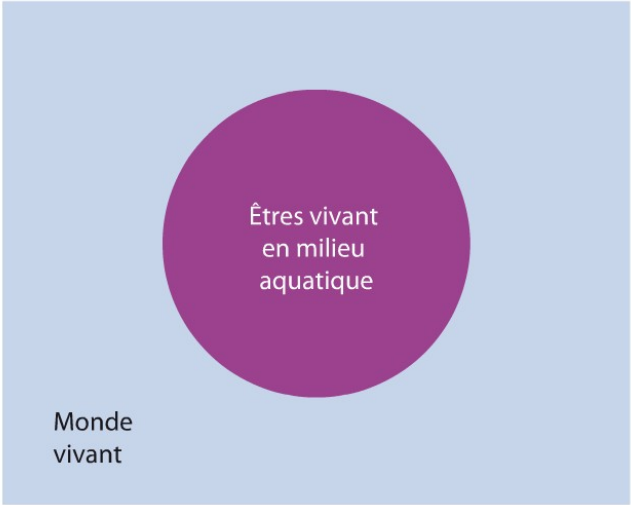


Figure 4-84. Diagramme de Venn très simple montrant la relation entre un groupe et le monde qui l'englobe.

Créons maintenant un troisième groupe représentant les êtres vivant sur terre. Il existe des êtres qui vivent à la fois sur terre et dans l'eau, par exemple les grenouilles. Le diagramme de Venn de la figure 4-85 montre que les groupes se chevauchent.

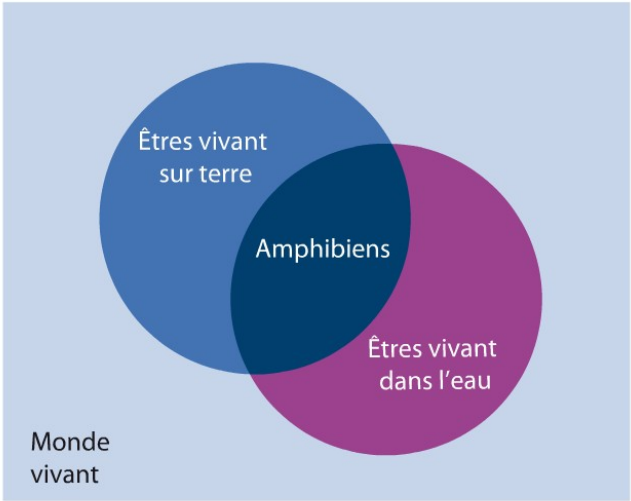


Figure 4-85. Ce diagramme de Venn est une manière de montrer que certains êtres vivent sur terre, d'autres dans l'eau, et que d'autres encore vivent aussi bien sur terre que dans l'eau.

Toutefois, tous les groupes ne se chevauchent pas. Dans la figure 4-86, j'ai créé un groupe d'êtres munis de sabots et un autre groupe d'êtres ayant des griffes. Existe-t-il des êtres munis à la fois de sabots et de griffes ? Je ne pense pas. Je peux l'exprimer à l'aide d'une *table de vérité* (figure 4-87).

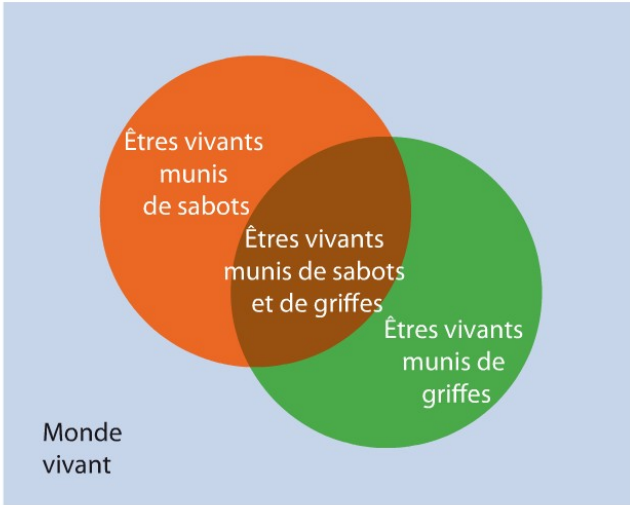


Figure 4-86. Certains sous-groupes ne se chevauchent pas. Je ne pense pas que des créatures puissent avoir à la fois des sabots et des griffes.

Cette créature est munie de sabots.	Cette créature a des griffes.	Cette combinaison peut exister.
Non	Non	Vrai
Non	Oui	Vrai
Oui	Non	Vrai
Oui	Oui	Faux

Figure 4-87. La forme la plus simple d'une table de vérité établit la validité de paires d'affirmations pouvant avoir deux états.

Une porte NON-ET (NAND) pourrait représenter cette table, car la combinaison de ses entrées est identique (figure 4-88).

Si l'entrée A de la porte NON-ET est	Et si l'entrée B de la porte NON-ET est	Alors, la sortie de la porte NON-ET sera
Basse	Basse	Haute
Basse	Haute	Haute
Haute	Basse	Haute
Haute	Oui	Basse

Figure 4-88. Cette table de vérité a exactement la même forme que la précédente avec la porte NON-ET (figure 4-87).

En partant de ces principes très simples, Boole a développé son langage logique à un très haut niveau. Il a publié un traité en 1854, bien avant qu'il ne puisse s'appliquer à des systèmes électriques ou électroniques. De son vivant, son travail semblait ne présenter aucun intérêt pratique. Ce n'est que dans les années 1930, qu'un certain Claude Shannon découvrit la logique booléenne, pendant ses études au MIT et il décrivit, dans une publication de 1938, comment elle pouvait s'appliquer aux circuits utilisant des relais. Les applications furent immédiates, car les réseaux téléphoniques, alors en pleine expansion, devaient faire face à des problèmes de commutation complexes.

Prenons un exemple simple : deux abonnés partagent la même ligne téléphonique, si l'un ou l'autre souhaite utiliser la ligne, cela ne pose aucun problème. En revanche, ils ne peuvent pas l'utiliser simultanément. Nous retrouvons la même configuration logique que celle de la figure 4-88, si nous interprétons le fait qu'une personne veuille utiliser la ligne par HAUT et qu'elle ne veuille pas l'utiliser par BAS.

Néanmoins, il y a une différence importante : la porte NON-ET (NAND) ne se contente pas de représenter le réseau téléphonique, elle peut aussi le *contrôler*. Aux origines des réseaux téléphoniques, on utilisait des relais ; une combinaison de relais peut fonctionner comme une porte logique.

L'étape suivante est de montrer que si l'on utilise un niveau HAUT pour représenter le chiffre 1 et un niveau BAS pour le chiffre 0, il est possible de réaliser un système de portes logiques capable de compter. Et s'il peut compter, il peut aussi effectuer des calculs.

Quand les tubes électroniques ont remplacé les relais, les premiers calculateurs numériques purent être construits. Les transistors ont ensuite pris la place des tubes à vide, puis les circuits intégrés ont remplacé les transistors, permettant la réalisation des ordinateurs existants aujourd'hui. À la base de ces dispositifs incroyablement sophistiqués, ce sont les lois de la logique découvertes par George Boole qui continuent à être utilisées.

Pour l'utilisation d'un moteur de recherche, si vous utilisez les mots ET et OU, vous faites appel à des *opérateurs logiques*.

Fondamentaux : les portes logiques de base

La porte NAND est le composant de base des calculateurs numériques, car elle permet l'addition binaire (pour des raisons qui dépassent le cadre de ce livre). Pour en savoir plus, faites une recherche sur Internet avec les mots-clés « arithmétique binaire » et « demi-additionneur ». Vous pouvez également trouver des circuits réalisant des additions à l'aide des opérateurs logiques dans mon livre *L'électronique en pratique 2*.

Généralement, on distingue sept types de portes logiques : ET, NON-ET, OU, NON-OU, OU exclusif, NON-OU exclusif, NON (AND, NAND, OR, NOR, XOR, XNOR, NOT en anglais).

Leurs noms sont toujours écrits en majuscules. Seule la porte XNOR n'est pratiquement pas utilisée.

Toutes ces portes ont deux entrées et une sortie, à l'exception de la porte NON (NOT), qui ne possède qu'une entrée et une sortie et qui est souvent appelée *inverseur* (*invert*) ; lorsqu'elle reçoit un niveau haut en entrée, elle délivre une sortie au niveau bas et inversement.

Les symboles des sept portes sont illustrés sur la figure 4-89. J'ai utilisé les symboles américains car ce sont les plus populaires. Notez que les petits cercles en bas de certaines portes indiquent l'inversion de leur sortie. Ainsi, la sortie d'une porte NON-ET est l'inverse de la sortie d'une porte ET.

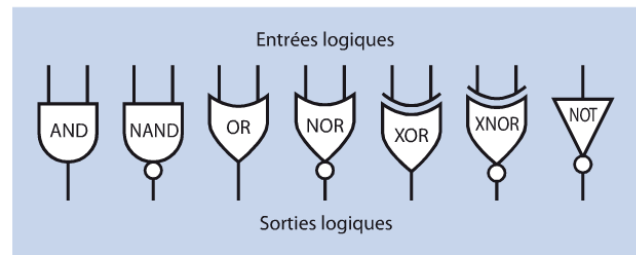


Figure 4-89. Symboles américains des six types de portes logiques à deux entrées et de l'inverseur à une seule entrée.

Que signifie « l'inverse » ? Cela va vous paraître plus clair en regardant les tables de vérité des portes logiques (figures 4-90, 4-91 et 4-92). Deux entrées sont représentées à gauche et une sortie à droite, dans chacune des tables. Le rouge correspond à l'état logique HAUT et le bleu à l'état logique BAS. En comparant les sorties de chaque paire de portes, vous verrez comment elles sont inversées.

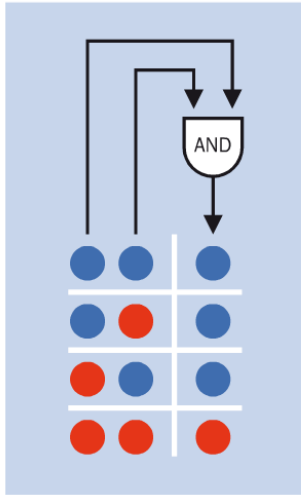


Figure 4-90. Les entrées indiquées à gauche provoquent les sorties de droite.

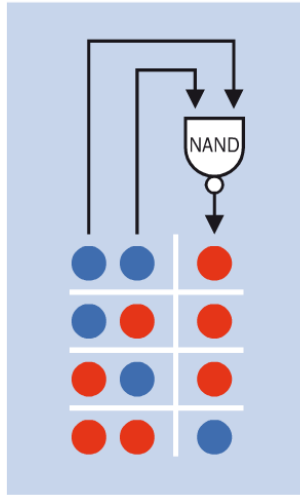


Figure 4-91. Les entrées indiquées à gauche provoquent les sorties de droite.

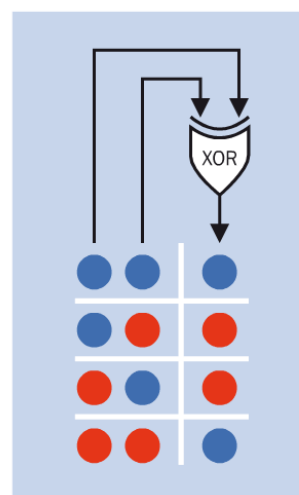
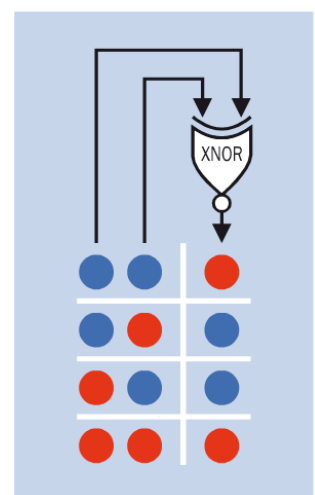


Figure 4-92. Les entrées indiquées à gauche provoquent les sorties de droite.



Historique : le monde déroutant des TTL et des CMOS

Dans les années 1960, les premières portes logiques furent construites avec la technologie TTL (*Transistor-Transistor Logic*, logique transistor-transistor), qui permettait de graver de minuscules transistors bipolaires sur une seule tranche de silicium. Elles furent bientôt suivies par les semi-conducteurs CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductors*). Le circuit intégré 4026B que vous avez utilisé dans l'expérience 19 est un ancien circuit CMOS.

Comme nous l'avons dit précédemment, les transistors bipolaires amplifient le courant. Les circuits TTL sont similaires : ils ont besoin d'un flux d'électricité conséquent pour fonctionner. En revanche, les circuits CMOS sont plus sensibles à la tension, ce qui leur permet de consommer très peu de courant lorsqu'ils sont en attente d'un signal ou lorsqu'ils sont en pause, après avoir délivré un signal de sortie.

Le tableau de la figure 4-93 résume les avantages et les inconvénients des deux types de circuits intégrés. Les composants de la série CMOS dont les références commencent à 4000 étaient lents et plus facilement endommagés par l'électricité statique, mais ils étaient appréciés car ils consommaient peu. Ceux de la série TTL dont les références commencent à 7400 consommaient beaucoup plus d'énergie, mais étaient moins sensibles et très rapides. Ainsi, pour développer un ordinateur, on utilisait la famille des circuits intégrés TTL, mais pour

fabriquer un petit dispositif appelé à fonctionner pendant plusieurs semaines, avec une simple pile, la technologie CMOS était plus adaptée.

	TTL	CMOS
	Série 7400 (utilisée ensuite par la technologie CMOS)	Série 4000 (utilisant ensuite la numérotation 7400)
Sensible à l'électricité statique 	Moins	Plus ?
Rapidité 	Plus rapide	Plus lent ?
Consommation électrique 	Supérieure	Très faible
Gamme de tension d'alimentation 	Étroite autour de 5 V	Plus large 5 à 15 V
Impédance d'entrée 	Basse	Très élevée

Figure 4-93. Tableau comparatif des circuits intégrés TTL et CMOS. Les points d'interrogation indiquent les domaines pour lesquels les CMOS rejoignent les TTL.

Ensuite, tout est devenu confus ; les fabricants de circuits CMOS voulant s'emparer d'une partie du marché reproduisaient les avantages des TTL. Les nouvelles générations de CMOS ont même changé leur numérotation en les faisant commencer par 74, pour souligner leur compatibilité et les fonctions des broches ont été permutées afin de correspondre à ceux des TTL. Les tensions d'alimentation nécessaires aux CMOS ont également été adaptées pour correspondre à celles des TTL.

De nos jours, vous pouvez encore trouver certains anciens circuits TTL, particulièrement dans la série LS (dont les références sont par exemple 74LS00 et 74LS08), mais ils sont devenus rares. Les circuits intégrés CMOS de la série 4000 sont les plus fréquents, comme le 4026B utilisé dans l'expérience précédente. Ils sont toujours fabriqués, en raison de leur gamme de tension d'alimentation importante.

Au fil des ans, les circuits intégrés CMOS sont devenus plus rapides et moins sensibles à l'électricité statique, ce qui explique pourquoi j'ai ajouté un point d'interrogation dans ces catégories dans la figure 4-93. Les CMOS récents ont également réduit leur tension d'alimentation à 5 V CC.

La situation peut se résumer ainsi :

- tous les circuits intégrés de l'ancienne série 4000 encore disponibles ont les caractéristiques indiquées dans la figure 4-93 ;
- il n'est plus recommandé d'utiliser les circuits intégrés de l'ancienne série TTL 7400, car ils ne présentent plus d'avantage significatif.

Vous trouverez des schémas qui utilisent des circuits intégrés 74LSxx. Vous pouvez les remplacer par ceux de la série 74HCxx, qui fonctionnent de la même manière.

La génération 74HCxx est de loin la plus utilisée pour les circuits intégrés traversants. Ils possèdent une impédance d'entrée élevée et ils sont moins coûteux que la plupart des versions plus récentes. Tous les circuits intégrés logiques utilisés dans ce livre sont du type HC.

Voyons maintenant comment sont indiquées leurs références. Dans la liste qui suit, la lettre « x » signifie qu'une lettre ou un chiffre peut apparaître à cet emplacement. Ainsi, « 74xx » comprend le circuit NAND 7400, le NOR 7402, le 74150 qui est un multiplexeur à 16 bits et ainsi de suite. Une combinaison de lettres avant « 74 » indique le fabricant, alors que des lettres placées à la suite de la référence peuvent indiquer le type de boîtier, si le circuit contient des métaux toxiques pour l'environnement et d'autres détails (figure 4-3).

Voici un historique de la famille TTL :

- 74xx : version originale, maintenant obsolète.
- 74Sxx : série « Schottky », plus rapide, maintenant obsolète.
- 74LSxx : série « Schottky » à faible consommation, encore utilisée de façon occasionnelle.

Famille CMOS :

- 40xx : version originale, aujourd'hui obsolète.
- 40xxB : la série 4000B a été améliorée, mais elle est toujours sensible à l'électricité statique. Ces circuits intégrés sont toujours fréquemment utilisés, en particulier par les amateurs d'électronique de loisirs.
- 74HCxx : série CMOS à grande vitesse, dont les références correspondent à celles de la série TTL, tout comme leurs brochages. J'utilise abondamment cette série dans ce livre, car elle est très largement répandue et ces circuits n'ont pas besoin d'être plus rapides et consomment peu d'énergie.

- 74HCTxx : identiques à la série HC, mais avec des caractéristiques identiques à celles de la série TTL en ce qui concerne la tension maximale du niveau bas et la valeur minimale du niveau haut.
- 74xx suivi d'autres lettres au milieu de la référence : versions plus modernes, plus rapides, en général de type CMS (composant monté en surface), particulièrement conçues pour des applications alimentées en tension faible.

Ce dont vous n'avez pas besoin

Les différences de rapidité n'ont pas d'utilité en ce qui nous concerne, car nous n'allons pas développer de circuits fonctionnant à des millions de cycles par seconde.

Les différences de prix entre les familles de circuits sont faibles quand on les achète en petites quantités.

Les circuits intégrés prévus pour une alimentation de faible tension ne conviennent pas à notre usage, en particulier parce qu'ils sont au format monté en surface et nous devrions disposer d'une tension d'alimentation plus faible. Les composants montés en surface ont pour seul intérêt la miniaturisation, mais ils sont très difficiles à mettre en œuvre ; c'est pourquoi je ne les utiliserai pas. Leurs équivalents à broches traversantes ont les mêmes fonctions.

Fondamentaux : fonctions et références

Les connexions internes des circuits intégrés traversants de la série HC actuellement disponibles, sont indiquées sur les figures 4-82 et 4-94 à 4-100.

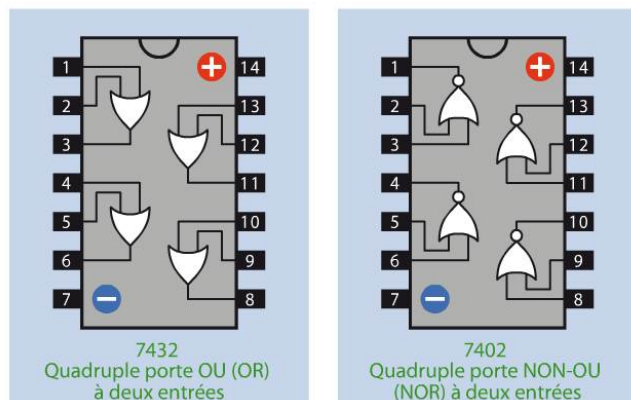


Figure 4-94. Configuration standard des circuits intégrés logiques 7432 et 7402.

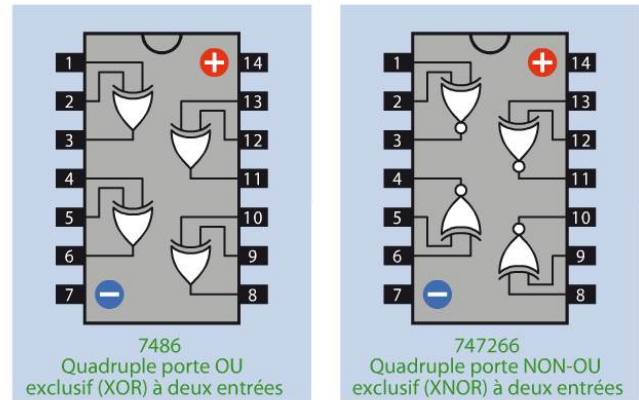


Figure 4-95. Configuration standard des circuits intégrés logiques 7486 et 747266.

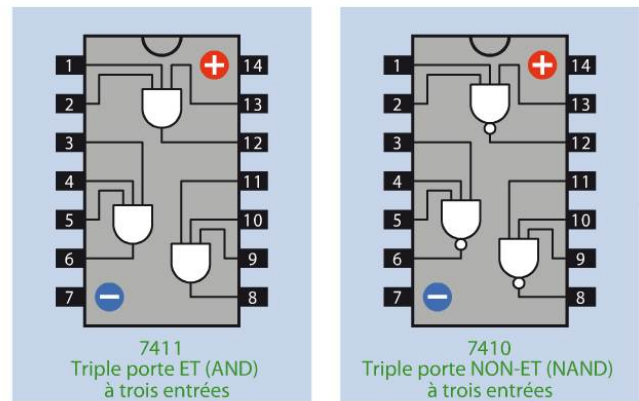


Figure 4-96. Configuration standard des circuits intégrés logiques 7411 et 7410.

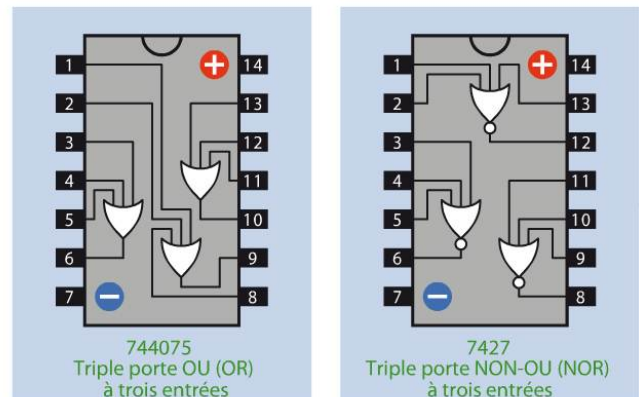


Figure 4-97. Configuration standard des circuits intégrés logiques 744075 et 7427.

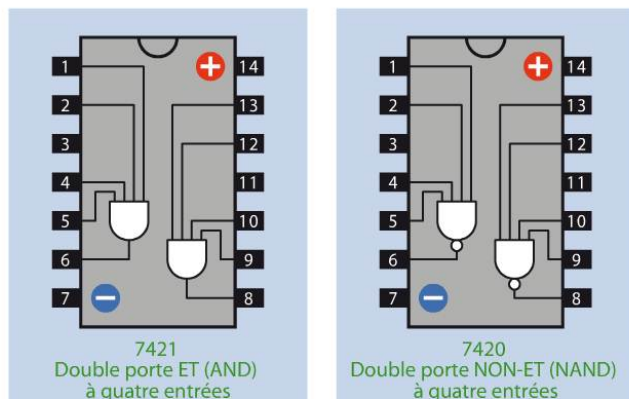


Figure 4-98. Configuration standard des circuits intégrés logiques 7421 et 7420.

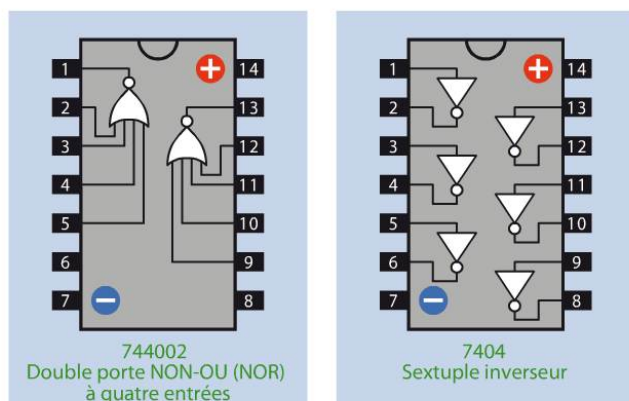


Figure 4-99. Configuration standard des circuits intégrés logiques 744002 et 7404.

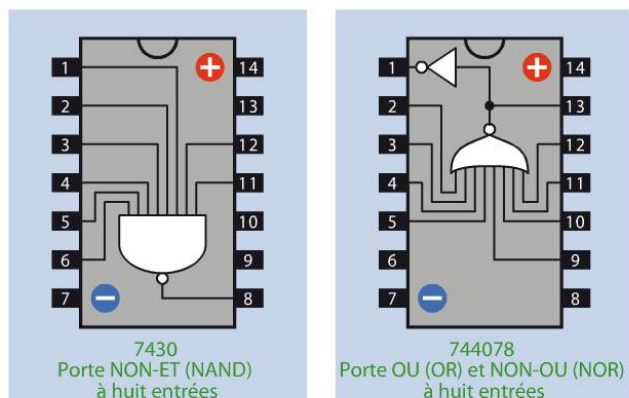


Figure 4-100. Configuration standard des circuits intégrés logiques 7430 et 744078.

Toutes les références de ces circuits intégrés sont indiquées dans leur forme générique. Ainsi, le 7400 peut avoir pour référence 74HC00, 74HCT00 et ainsi de suite, qui peut être précédée ou suivie par d'autres lettres codifiées, mais on parle en général du circuit intégré 7400.

Il est important de vérifier le brochage des circuits intégrés logiques par rapport aux figures précédentes ou aux fiches techniques des fabricants, avant de les utiliser. Les liaisons internes semblent suivre un cheminement identique, mais il y a des exceptions.

Fondamentaux : règles d'interconnexion des portes logiques

Autorisé

- Vous pouvez relier une entrée d'une porte à la masse ou au pôle positif de l'alimentation.
- Vous pouvez relier la sortie d'une porte directement à l'entrée d'une autre porte.
- La sortie d'une porte peut alimenter les entrées de plusieurs autres portes. C'est ce qu'on appelle la *fanout* ou *fan-out*, traduit en français par *arité sortante*. La quantité précise dépend du circuit. Dans le cas de la série 74HC, vous pouvez toujours relier au minimum dix entrées à une sortie logique.
- La sortie peut piloter la broche de déclenchement d'un temporisateur 555 si celui-ci utilise la même alimentation de 5 V CC.
- Le niveau bas d'une entrée ne doit pas être nécessairement de 0 V. Une porte 74HCxx reconnaîtra comme telle une tension jusqu'à 1 V.
- Le niveau haut d'une entrée n'est pas nécessairement de 5 V. Une porte 74HCxx reconnaîtra comme telle une tension supérieure à 3,5 V.

Les valeurs limites admises pour les entrées et celles fournies par les sorties sont indiquées sur la figure 4-101.

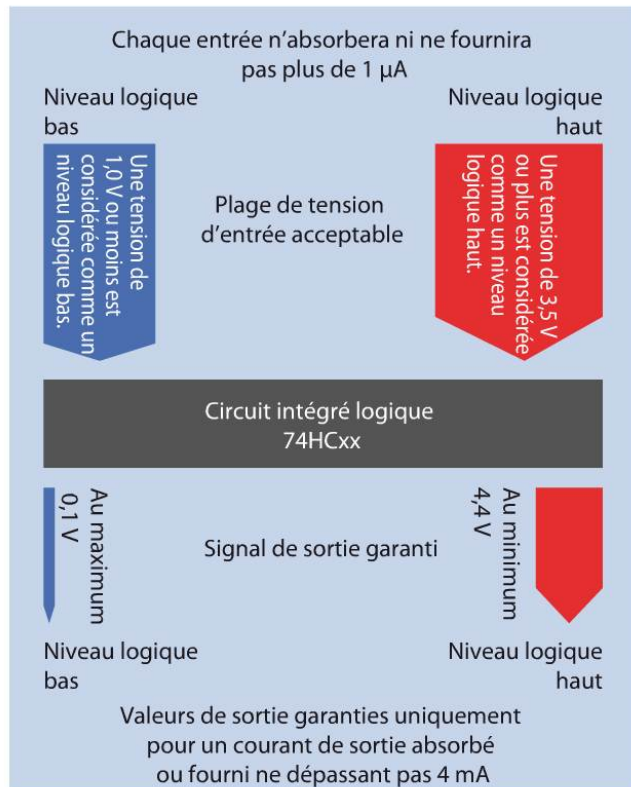


Figure 4-101. Pour éviter les dysfonctionnements des circuits intégrés logiques, respectez les normes.

Non autorisé

- Pas d'entrées flottantes ! Pour les circuits intégrés CMOS comme pour ceux de la famille HC, vous devez toujours relier toutes les entrées à un potentiel connu, y compris les entrées inutilisées.
- Un interrupteur non inverseur relié à une entrée doit être utilisé, en conjonction avec une résistance de tirage (au niveau haut) ou de rappel (au niveau bas), afin de ne laisser aucune entrée flottante.
- N'utilisez pas une source de tension non régulée, ou supérieure à 5 V, ou inférieure à 5 V, pour alimenter les circuits intégrés de la série 74HCxx.
- Soyez prudents en utilisant la sortie d'un circuit intégré 74HCxx pour alimenter une LED. Vous pouvez fournir une intensité atteignant 20 mA, mais cela provoquera une baisse de la tension de sortie. Si cette sortie est aussi connectée à l'entrée d'un autre circuit, la tension pourrait être trop faible pour être reconnue comme niveau haut. Il vaut mieux ne jamais utiliser une sortie logique pour alimenter *simultanément* une

LED et l'entrée d'un circuit intégré. Vérifiez toujours les tensions et les intensités quand vous créez ou modifiez un circuit.

- Tout au long de ce livre, j'utilise des LED à faible consommation sur les sorties des circuits intégrés logiques, c'est un bon réflexe à acquérir, notamment si vous êtes amené à réutiliser une sortie qui alimentait une LED pour alimenter l'entrée d'une autre porte.
- Ne reliez jamais une sortie à une source de tension ou de courant significative. En d'autres termes, *ne reliez jamais une sortie à une autre sortie*.
- Pour la même raison, ne reliez jamais ensemble les sorties de plusieurs portes logiques.

Passons maintenant à une application des circuits intégrés logiques.

Expérience 21 : un code secret

Supposons que vous vouliez empêcher d'autres personnes d'utiliser votre ordinateur. Il y a deux manières de faire : soit par un logiciel, soit par un dispositif électronique. Le logiciel pourrait être un programme qui intercalerait la procédure de démarrage de l'ordinateur en demandant un mot de passe.

Ce que j'imagine est un clavier numérique sur lequel un utilisateur doit entrer une combinaison secrète avant que l'ordinateur ne soit mis sous tension. Ce « verrou électronique » se contente de désactiver le bouton d'allumage de l'ordinateur.



Problème de garantie

Si vous réalisez ce projet, vous devrez ouvrir votre ordinateur, couper un fil et y insérer votre propre circuit. Vous ne devrez pas opérer à proximité des cartes internes de l'ordinateur et prendre garde à ne couper que le fil relié au bouton de mise sous tension. Si vous avez récemment acheté votre ordinateur, la garantie deviendra nulle. Si cela vous inquiète, vous avez trois possibilités :

- réaliser le circuit sur une plaque d'essai et en rester là ;
- utiliser ce circuit avec un autre appareil ;
- utiliser ce circuit sur un ancien ordinateur.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 LED à faible consommation
- 1 LED générique
- 1 régulateur de tension LM7805
- 1 circuit intégré 74HC08
- 1 circuit intégré temporisateur 555
- 1 transistor 2N2222
- 1 relais DPDT de 9 V CC
- 1 diode 1N4001 et 3 diodes 1N4148
- 1 résistance de 330 Ω , 1 de 470 Ω , 1 de 1K, 1 de 2,2K, 6 de 10K et 1 de 1M
- 1 condensateur de 0,01 μ F, 1 de 0,1 μ F, 1 de 0,33 μ F et 2 de 10 μ F
- 8 interrupteurs tactiles
- En option : des outils pour ouvrir votre ordinateur, percer quatre trous et découper entre les trous afin de réaliser une ouverture rectangulaire pour le clavier (si vous menez ce projet à son terme). Vous aurez également besoin de petits boulons pour fixer le clavier au boîtier de votre ordinateur après avoir créé l'ouverture correspondante.

Circuit en trois parties

La réalisation complète de ce projet sur une plaque de montage est représentée sur la figure 4-106, mais avant que vous ne commenciez son montage, examinons-en le schéma.

Le circuit est divisé en trois parties :

1. L'alimentation et trois boutons-poussoir inactifs.
2. Les boutons-poussoir actifs et la logique.
3. La sortie.

Le schéma de la figure 4-102 montre la première partie, qui est assez simple. Un appui sur le bouton A fournit la tension de 9 V CC au régulateur de tension, qui génère l'alimentation de 5 V CC sur le bus à gauche. Ce bouton délivre également la tension de 9 V CC au fil violet situé

à droite, pour un usage que je vais évoquer d'ici peu. De plus, n'importe lequel des boutons B, C et D réalise une liaison avec la masse.

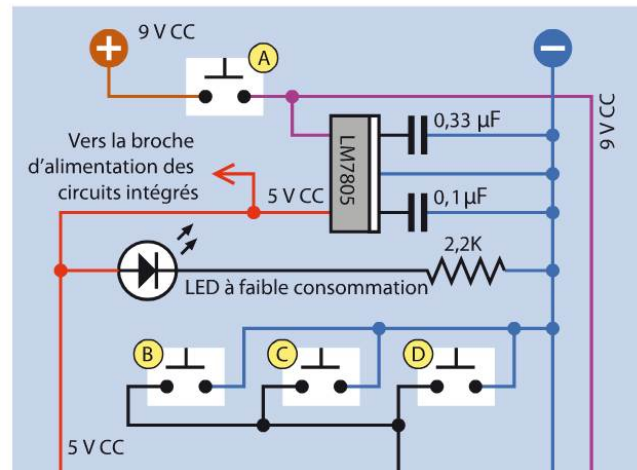


Figure 4-102. Partie supérieure du circuit.

La partie centrale du circuit est illustrée par la figure 4-103, sous forme de symboles logiques. Imaginez-la reliée à la partie supérieure du circuit de la figure 4-102. Chacun des boutons E à H peut fournir une tension positive à la porte ET (AND), dont l'entrée la plus à gauche est maintenue au niveau bas par la résistance de rappel de 10K. La sortie de chaque porte est reliée à l'entrée de la porte suivante.

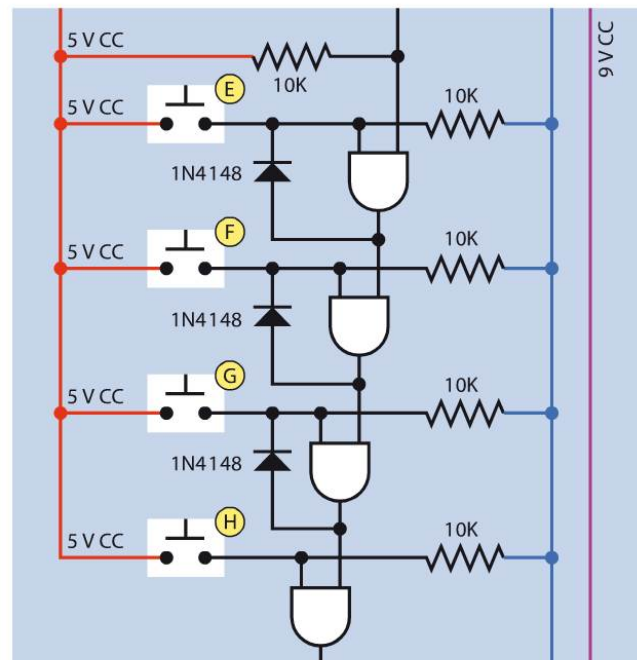


Figure 4-103. Partie centrale du circuit, représentée par des symboles logiques.

Pour terminer, la figure 4-104 montre la partie inférieure du circuit, où la sortie de la dernière porte ET (AND) active un transistor qui déclenche un temporisateur 555. Ce dernier contrôle un relais qui verrouille ou déverrouille l'ordinateur.

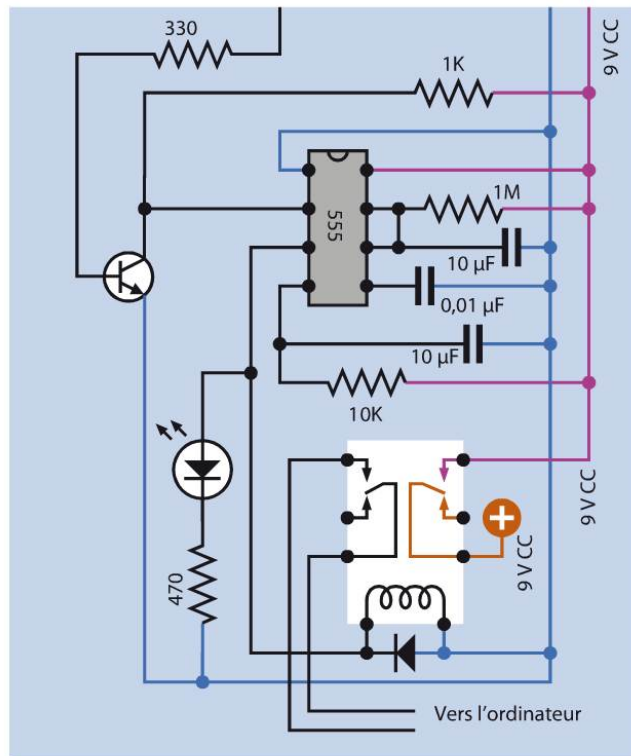


Figure 4-104. Partie inférieure du circuit.

Fonctionnement du circuit

Vous devez appuyer sur le bouton A pour activer le circuit et le maintenir enfoncé pendant que vous appuyez selon une séquence secrète sur les boutons-poussoir. Ceci répond à deux besoins : le circuit n'absorbe aucun courant lorsqu'il n'est pas utilisé et vous ne risquez pas de le laisser sous tension par erreur.

La séquence secrète consiste à appuyer sur les boutons E, F, G et H dans cet ordre, tout en maintenant le bouton A enfoncé. Bien entendu, vous pourrez modifier la position des boutons. Je les ai représentés ainsi sur la plaque de montage par simplicité.

Maintenez le bouton A enfoncé et appuyez sur le bouton E en premier dans la séquence afin de déverrouiller le circuit. Sur la figure 4-103, vous voyez que le bouton E applique directement la tension de 5 V sur l'entrée gauche de la première porte ET (AND). Cela prend le dessus sur la résistance de rappel, de sorte que l'entrée

gauche est maintenant au niveau haut. L'entrée à droite de la porte ET (AND) est également maintenue au niveau haut par une résistance de 10K. En conséquence, sa sortie passe au niveau haut.

La sortie est réinjectée sur l'entrée à gauche en passant par une diode. En conséquence, vous pouvez maintenant relâcher le bouton E ; la sortie de la porte ET (AND) maintiendra l'entrée à gauche au niveau haut. La porte s'est auto verrouillée, comme le relais de l'expérience 15. Elle est capable de se comporter ainsi, car elle a sa propre alimentation (non illustrée sur le schéma) qui maintient la tension de sortie malgré la faible diminution de la tension d'entrée.

La sortie haute de la première porte ET (AND) est également reliée à l'entrée à droite de la deuxième porte ET. Si vous appuyez sur le bouton F permettant à son entrée gauche de devenir positive, la sortie de la deuxième porte ET devient haute. Remarquez que le bouton n'aurait pas eu d'effet avant, car la sortie de la première porte ET reliée à la deuxième porte ET doit être au niveau haut pour qu'il agisse.

- Après avoir appuyé sur chaque bouton, la porte ET qui lui est associée se verrouille automatiquement et vous pouvez relâcher le bouton.
- Vous devez appuyer sur les boutons dans le bon ordre ; sinon, il ne se passera rien.
- Vous devez maintenir appuyé le bouton A pendant toute la procédure.

Observez les boutons C, D et E. Si vous appuyez sur l'un d'entre eux pendant la séquence d'entrée du code de déverrouillage du circuit, il forcera un niveau bas sur l'entrée droite de la première porte ET. En conséquence, sa sortie passera au niveau bas. Si la porte avait été préalablement verrouillée, elle se déverrouille. Et ensuite, la sortie basse de la première porte ET déverrouillera la deuxième porte, qui déverrouillera à son tour la suivante.

N'importe lequel des boutons C, D et E provoquera donc une réinitialisation de tout le circuit afin de rendre l'entrée de la bonne combinaison plus difficile. Dans votre circuit les boutons auront probablement tous la même apparence.

Et si l'on appuie simultanément sur plusieurs boutons ?

Que se passera-t-il si quelqu'un appuie sur plus d'un bouton à la fois, tout en maintenant appuyé le bouton A ? Le résultat est imprévisible. Si tous les boutons E, F, G et H

sont enfoncés simultanément, le relais sera activé, sauf si l'un des boutons B, C ou D l'est également, ce qui bloquerait toute action. La possibilité d'appuyer simultanément sur plusieurs boutons peut être considérée comme une faiblesse de ce circuit. Toutefois, la probabilité que quelqu'un presse les boutons A, E, F, G et H sans appuyer sur B, C ou D est faible. Pour réduire ce risque, vous pourriez ajouter d'autres boutons de réinitialisation reliés en parallèle avec les boutons B, C et D.

Déclenchement du relais

Si vous avez entré la bonne combinaison. La dernière porte ET délivre une tension proche de 5 V à la base du transistor (figure 4-104). Cela réduit la résistance entre la masse et la broche 2 du temporisateur, qui est forcée au niveau bas ; le temporisateur est alors déclenché. Il est alimenté en 9 V par l'intermédiaire du fil violet situé à droite. Sa sortie devrait être suffisante pour activer le relais.

Voyons maintenant comment réagit le relais. Son jeu de contacts de droite force l'alimentation du bus de 9V. Aussi longtemps que l'impulsion issue du temporisateur 555 demeure, le relais maintient ses contacts fermés. Tant que ses contacts sont fermés, le circuit reste sous tension, y compris le 555. Oui, le temporisateur active le relais et le relais alimente le temporisateur.

Le bouton A peut donc être relâché ; le relais restera verrouillé pendant toute la durée de l'impulsion du temporisateur. Cette impulsion cessera au bout d'environ 30 s, provoquant la coupure de l'alimentation du relais et l'ouverture de ses contacts. Cela coupera l'alimentation du temporisateur et du reste du circuit, qui ne consommera plus d'énergie.

Le jeu de contacts de gauche du relais est prévu pour alimenter le bouton de mise sous tension de votre ordinateur. Ainsi, vous pourrez allumer ce dernier durant la période d'activation du relais par le temporisateur. Le reste du temps, le bouton de mise en marche ne fonctionnera pas.

Circuit intégré logique utilisé

Observez la figure 4-105. Elle représente la partie centrale du circuit, redessinée en utilisant le circuit intégré 74HC08 contenant quatre portes ET (AND) à deux entrées. Il s'agit d'un schéma dont le fonctionnement est identique à celui de la figure 4-103. La grosse différence est la représentation du circuit intégré montrant les interconnexions

avec les autres composants, mais vous trouverez probablement ce schéma plus difficile à comprendre. Les diagrammes logiques ont leur intérêt.

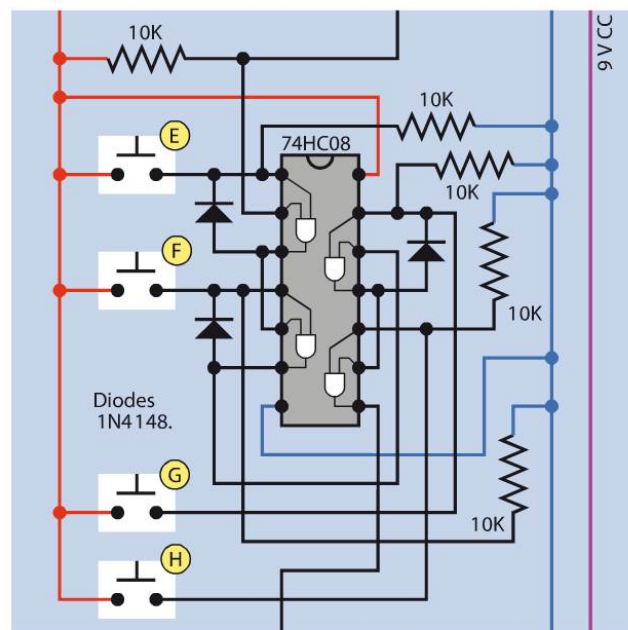


Figure 4-105. Partie centrale du circuit représentant les composants.

Réalisation

La figure 4-106 montre la plaque de montage terminée. Il est impossible de tester ce circuit en plusieurs étapes ; vous devez câbler l'ensemble. Les valeurs des composants sont indiquées sur la figure 4-107.

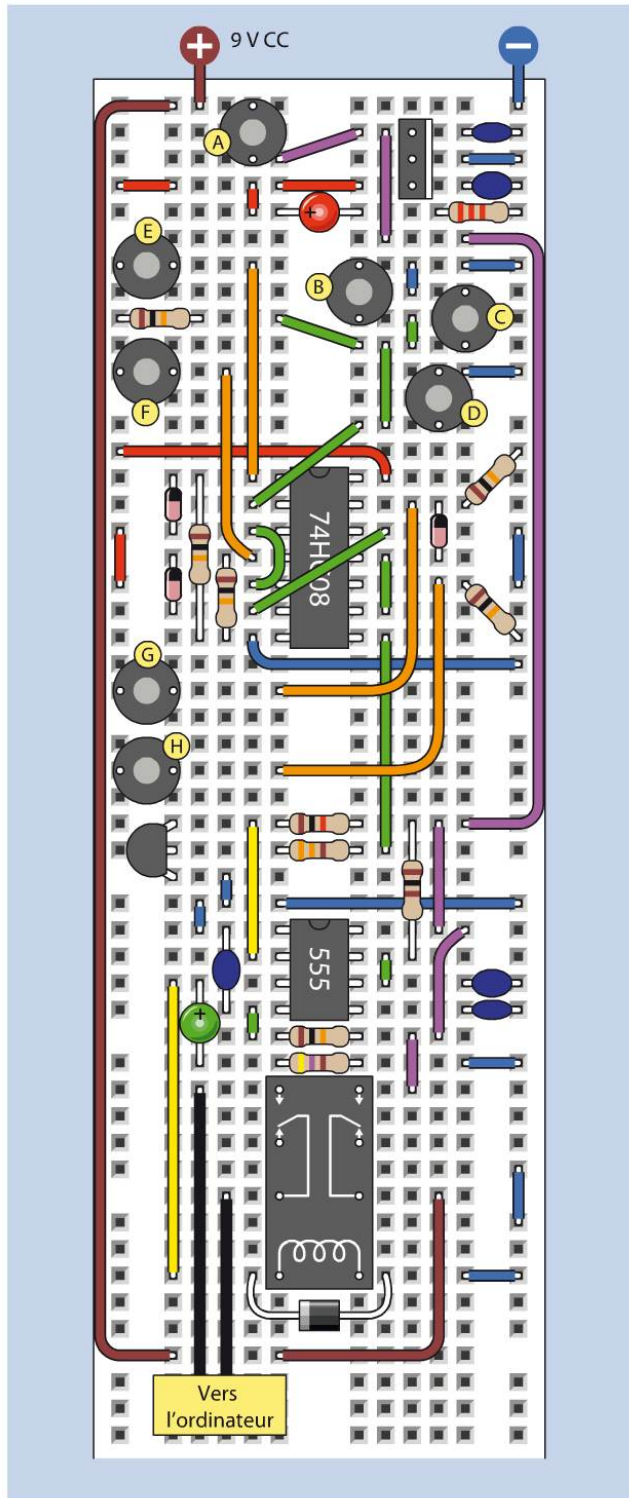


Figure 4-106. Plaque de montage du verrou électronique terminé.

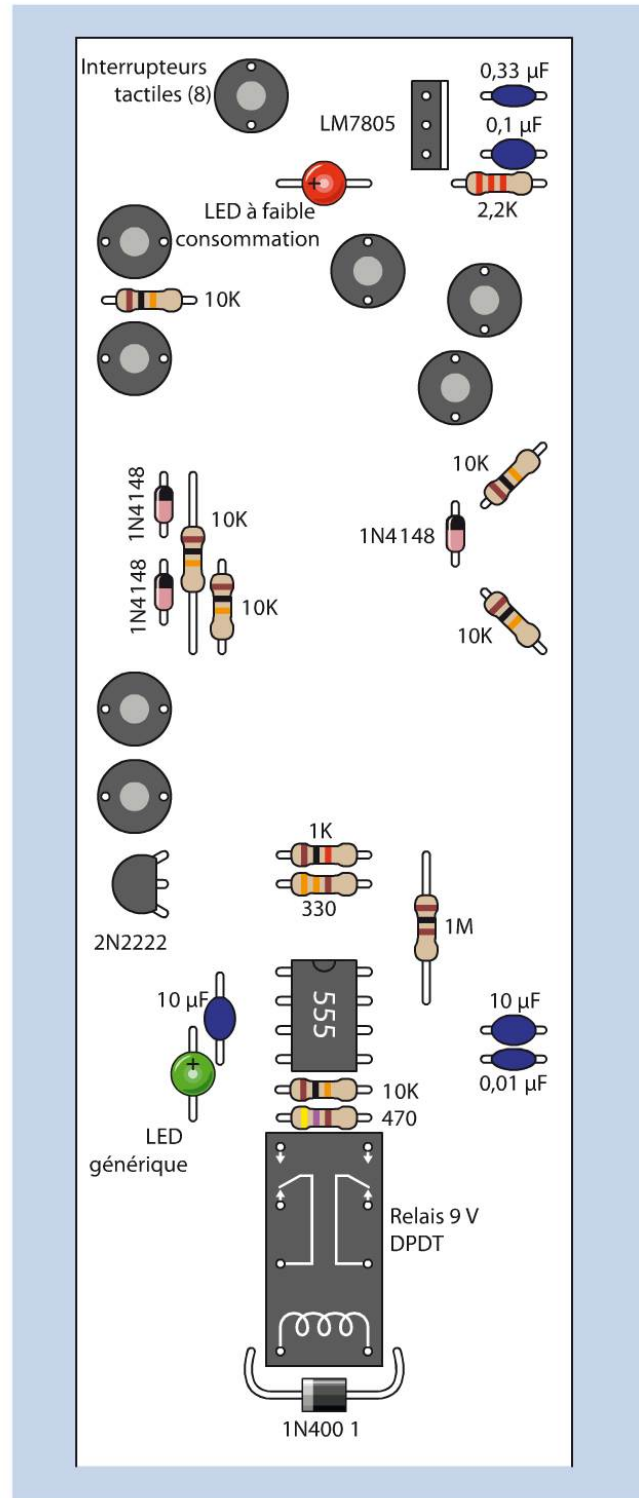


Figure 4-107. Valeurs des composants du montage.

Mise en œuvre

Faites bien attention à maintenir les deux tensions d'alimentation du circuit isolées l'une de l'autre. L'alimentation de 5 V CC est trop faible pour activer le relais et celle de 9 V CC détruirait le circuit intégré logique. Le bus à gauche de la plaque est utilisé pour la tension de 5 V CC. Celle de 9 V CC non commutée est amenée au relais par le fil marron à gauche de la platine de montage. Les fils violets à droite distribuent la tension de 9 V commutée par l'interrupteur A ou par les contacts de droite du relais.

- Le marron correspond à l'alimentation 9 V CC non commutée provenant de la pile ou de l'adaptateur secteur.
- Le violet correspond à la tension de 9 V CC commutée par le relais ou le bouton A.
- Le rouge distribue la tension de 5 V CC fournie par le régulateur de tension.

Après avoir réalisé le circuit, reliez l'alimentation de 9 V CC et appuyez sur le bouton A. La LED rouge doit s'allumer, mais rien d'autre ne se passe.

Tout en maintenant le bouton A enfoncé, appuyez successivement sur chacun des boutons E, F, G et H, de bas en haut. Lorsque la séquence est terminée, la LED verte doit s'allumer, indiquant que le relais est activé et que le circuit a été correctement déverrouillé.

Relâchez le bouton A, la LED verte doit rester allumée pendant environ 30 s avant de s'éteindre. Durant ce délai, si le circuit est installé dans votre ordinateur, vous pourrez le mettre sous tension.

Lorsque le circuit s'éteint tout seul, il ne consomme plus d'énergie. Vous pouvez donc l'alimenter par une pile de 9 V qui devrait durer des années.

Essayez à nouveau de maintenir le bouton A enfoncé et appuyez sur E, F, G et H selon une séquence différente. Essayez également d'appuyer sur certains des boutons B, C et D ; la LED verte ne doit pas s'allumer et le relais ne s'active pas.

Si vous terminez et installez une version définitive de ce circuit, pour pouvoir casser le code, une personne mal intentionnée devrait savoir que :

- Le bouton A doit être maintenu enfoncé pendant l'entrée de la séquence correcte.
- Si un mauvais bouton est enfoncé, il est nécessaire de recommencer la saisie du code depuis le départ.

- Seuls les boutons E, F, G et H sont actifs et qu'ils doivent être enfoncés dans cet ordre.

Même s'il s'agit d'une procédure très sûre, vous pouvez ajouter des boutons pour améliorer la sécurité !

Vérification

Réglez votre multimètre pour la vérification de continuité et reliez ses pointes de touche, à l'aide de pinces crocodiles, aux sorties du relais marquées « vers l'ordinateur » (figure 4-104). Ces deux fils ne véhiculent aucune tension, c'est pourquoi vous devez contrôler que les contacts du relais ont bien été fermés.

Entrez la combinaison correcte à l'aide des boutons ; le multimètre devrait émettre un bip sonore. Relâchez le bouton A ; le multimètre devrait continuer à émettre son signal sonore pendant que le 555 active le relais. À la fin du cycle du temporisateur, le relais ouvre son contact et le multimètre doit cesser d'émettre son bip sonore.

Vous pouvez maintenant reconfigurer votre multimètre pour la mesure d'intensité et l'insérer entre le pôle positif de la pile et le point d'entrée de la tension de 9 V CC sur la plaque de montage. Le multimètre ne doit indiquer aucune consommation électrique tant que le bouton A n'est pas enfoncé.

Utilisation des diodes

Ce circuit contient deux types de verrouillage.

- Le système de verrouillage du relais n'est pas conventionnel, mais il évite au circuit de consommer de l'énergie quand il n'est pas utilisé.
- La quatrième porte ET n'a pas besoin de se verrouiller, car une courte impulsion reçue du bouton H suffit à déclencher le temporisateur. En revanche, les trois premières portes ET doivent se verrouiller afin de conserver leurs sorties positives après relâchement des boutons E, F et G. Les diodes rendent cela possible en réinjectant le niveau haut des sorties des portes à leurs entrées.

Toutefois, rappelez-vous qu'une diode nécessite environ 0,7 V et que les entrées d'une porte doivent différencier clairement un niveau haut d'un niveau bas. Si vous multipliez les diodes dans un circuit, sans faire prendre garde aux tensions, vous pourriez aboutir à ce qu'une porte ne reconnaisse pas un niveau supposé être haut. C'est exactement le même problème que dans l'expérience 15, où

une tension réduite par un transistor suivi d'une diode aurait pu empêcher le relais de s'activer.

Quand un doute subsiste, mesurez les tensions avec votre multimètre et vérifiez leur conformité avec les spécifications d'entrée de la figure 4-101.

Dans notre circuit, la sortie de chacune des trois portes ET est réinjectée par l'intermédiaire d'une seule diode à une de ses entrées ; il n'y a donc aucune raison que cela ne soit pas fiable. Vous devez toujours agir avec précaution et modération lorsque vous mélangez des diodes et des circuits intégrés logiques.

Une autre possibilité de verrouillage serait de remplacer la diode par une liaison directe réinjectant la sortie de la porte à son entrée. Cependant, la tension positive appliquée par un bouton-poussoir serait aussi appliquée à la sortie de la porte, d'où l'intérêt de la diode.



Il est absolument déconseillé de forcer la tension d'une sortie.

La meilleure option pour verrouiller un état logique dans un circuit consiste à utiliser une bascule bistable. J'ai déjà utilisé un 555 câblé en mode bistable pour vous faire comprendre cette fonction. Cependant, installer dans notre circuit quatre temporisateurs 555 pour cela n'aurait pas de sens. Vous pouvez, en effet, vous procurer des circuits intégrés contenant plusieurs bascules bistables, ou bien réaliser une bascule en combinant deux portes NON-ET (NAND) ou deux portes NON-OU (NOR), comme vous le verrez dans l'expérience 22.

Pour le verrou électronique, j'ai souhaité minimiser le nombre de circuits intégrés et sa complexité. L'utilisation des diodes est la façon la plus simple d'y parvenir.

Questions

- La sortie de la quatrième porte ET délivre une impulsion positive unique. Pourquoi ne pas l'utiliser pour activer directement le relais, au lieu d'ajouter un temporisateur ?

Lors de son activation, un relais consomme une pointe de courant supérieure aux 20 mA que peut fournir une porte ET. Je souhaitais également obtenir une sortie de durée déterminée par le temporisateur.

- Pourquoi avoir ajouté un transistor au circuit ?

C'est parce que la porte ET délivre une impulsion positive et que le temporisateur exige une transition négative sur sa broche de déclenchement. Le transistor convertit un front positif en transition négative. L'ajout d'une porte NON (NOT) aurait produit le même résultat, mais il aurait fallu augmenter le nombre de circuits intégrés.

- Dans ce cas, pourquoi ne pas avoir utilisé de portes NON-ET (NAND) au lieu des portes ET (AND) ?

Une porte NON-ET possède une sortie normalement au niveau haut, qui passe au niveau bas quand ses entrées sont au niveau haut. C'est exactement ce dont le 555 a besoin. Avec une porte NON-ET (NAND), le transistor aurait pu être omis.

C'est vrai, mais les autres portes ET (AND) ont besoin d'une sortie au niveau haut réinjectée à l'une de leurs entrées pour se maintenir. Les portes ET auraient donc été nécessaires pour les trois premiers boutons-poussoir. Seule la dernière porte, créant un niveau bas pour le temporisateur, aurait pu être remplacée par une porte NON-ET. Le circuit intégré 74HC08, toujours présent aurait été complété d'un circuit intégré 74HC00, avec une seule de ses portes active. Un transistor est plus facile à utiliser et prend moins de place.

- Pourquoi avoir prévu deux LED dans le circuit ?

Elles servent simplement à indiquer ce qui se passe pendant que vous appuyez sur les boutons afin de déverrouiller l'ordinateur. La LED de mise sous tension indique que la pile n'est pas usée. La LED d'activation du relais informe du déverrouillage du circuit, si le bruit du relais n'est pas perceptible.

- Pour terminer, la question principale : comment installer ce circuit dans un ordinateur, pour qu'il soit effectif ?

Comme je vais vous le montrer, c'est plus facile qu'il n'y paraît.

Interfaçage avec l'ordinateur

Commencez d'abord par vérifier que le circuit du verrou électronique est correctement réalisé. Une simple erreur de câblage pourrait délivrer une tension de 9 V CC par l'intermédiaire des contacts de gauche du relais, au lieu de fournir un contact fermé. C'est très important !

Réglez votre multimètre pour la mesure de tensions continues, reliez ses cordons de mesure au bus négatif de l'alimentation et sur l'un des fils du relais devant être reliés à l'ordinateur, puis entrez la combinaison correcte à l'aide des interrupteurs tactiles. Si la LED verte s'allume alors que votre multimètre n'indique aucune tension, tout est parfait. Dans tous les autres cas, vous avez fait une erreur de câblage.

Considérons maintenant la façon dont votre ordinateur fonctionne quand on veut le mettre sous tension.

Les anciens ordinateurs étaient équipés d'un interrupteur placé à l'arrière, sur le boîtier d'alimentation qui transformait la tension du secteur en différentes tensions réglées nécessaires aux composants internes. Aujourd'hui, l'ordinateur reste relié au secteur électrique et il est nécessaire d'appuyer sur un bouton-poussoir situé en façade ou sur son clavier (Mac). Ce bouton est relié à la carte mère par un câble interne.

C'est l'idéal en ce qui nous concerne, car nous n'avons pas à nous confronter à des tensions élevées. À l'intérieur de l'ordinateur, vous n'aurez même pas à ouvrir le boîtier équipé d'un ventilateur, qui contient les circuits d'alimentation. Recherchez le câble qui relie l'interrupteur de mise sous tension à la carte-mère. La plupart du temps, il ne comporte que deux conducteurs et parfois, il fait partie d'un câble plat. La solution consiste à observer les broches de contact du bouton-poussoir ; c'est là que se trouvent reliés les fils que vous cherchez.

Assurez-vous d'abord que votre *ordinateur est bien débranché*, reliez-vous à la terre – les ordinateurs ont des circuits CMOS sensibles à l'électricité statique – et coupez soigneusement l'un des deux fils du bouton-poussoir. Rebranchez l'ordinateur et appuyez sur l'interrupteur de *mise sous tension*. Si rien ne se passe, vous avez probablement déconnecté le bon fil. Même s'il ne s'agit pas de la bonne liaison, elle bloque la mise sous tension de l'ordinateur, et c'est ce que nous recherchons ; vous pouvez donc l'utiliser.

Rappelez-vous que nous n'allons pas envoyer de tension sur ce fil. Nous allons simplement utiliser le relais comme un interrupteur pour reconnecter la liaison que vous venez de couper. Cela ne devrait poser aucun problème si vous opérez dans le calme et repérez la connexion à partir de laquelle nous allons commencer. Si vous avez vraiment peur de commettre une erreur, vérifiez le manuel de maintenance de votre ordinateur.

Une fois que vous avez coupé l'un des conducteurs du câble, laissez l'ordinateur pour les étapes suivantes.

Localisez le point de raccordement à la carte-mère. Il s'agit habituellement d'un petit connecteur enfichable. Repérez-le afin de le reconnecter correctement. Mieux encore, photographiez-le, puis déconnectez-le pour les deux étapes qui suivent.

Dénudez les deux extrémités du fil que vous avez coupé et soudez une longueur de câble à deux conducteurs comme le montre la figure 4-108, en utilisant de la gaine thermorétractable pour protéger les points de soudure (c'est très important).

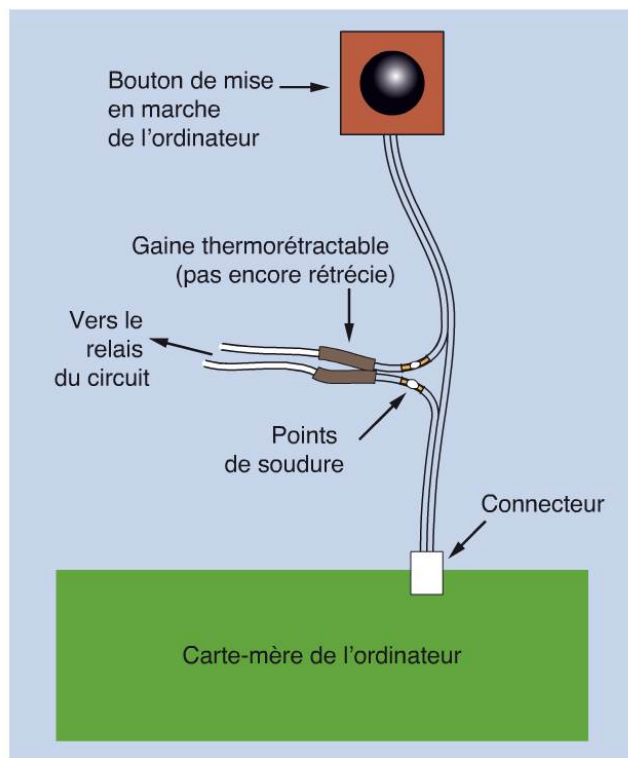


Figure 4-108. Le verrou électronique peut être connecté à un ordinateur en coupant un des conducteurs du câble relié au bouton-poussoir de mise en marche, puis en lui soudant une longueur de câble et en isolant les points de soudure à l'aide de gaine thermorétractable.

Faites parvenir au relais la longueur de câble ajoutée, en vous assurant de relier les fils aux contacts internes du relais qui se ferment lorsqu'il est activé par le circuit de déverrouillage. Vous ne devez pas pouvoir mettre en marche votre ordinateur quand vous pensez que le circuit est verrouillé, et inversement.

Reconnectez le câble à la carte-mère, branchez l'ordinateur et appuyez sur le bouton de mise en marche de l'ordinateur. Si rien ne se passe, tout va bien ! Entrez maintenant la combinaison secrète sur les boutons-poussoir (tout en maintenant enfoncé le bouton d'alimentation du circuit) et attendez que la LED verte s'allume. Appuyez à nouveau sur le bouton d'allumage de l'ordinateur ; tout devrait fonctionner (si vous appuyez sur ce bouton dans les 30 s accordées par votre circuit).

Maintenant que vous avez testé votre circuit, il ne vous reste plus qu'à l'installer.



Figure 4-109. Une manière d'installer le clavier du circuit (que je ne recommande pas).

Améliorations possibles

Utilisation d'un clavier. Dans l'édition précédente de ce livre, j'ai suggéré d'utiliser un clavier numérique pour ce

projet. Mais certains lecteurs ont cru qu'un clavier coûtait trop cher, tandis que d'autres ont rencontré des difficultés à trouver le bon type de clavier. Après mûre réflexion, j'ai décidé de n'utiliser que des interrupteurs tactiles : ils sont faciles à installer sur une plaque de montage et, si vous décidez de réaliser le circuit sous une forme définitive, il suffira de monter huit boutons-poussoir sur une plaque en plastique. Un clavier reste toutefois une bonne alternative, à condition qu'il ne soit pas à *codage matriciel* ; ce type de clavier est prévu pour un usage avec un microcontrôleur. Le modèle dont vous avez besoin doit posséder autant de broches que de boutons, plus une.

Alimentation du relais. On peut se demander si la tension de sortie du temporisateur 555 est suffisante pour activer le relais de façon fiable. C'était déjà le cas dans l'expérience 15, lorsqu'il était préférable de ne pas alimenter le relais à travers une combinaison transistor-diode. Le problème est causé par une tension de sortie du temporisateur variable selon la charge de sa sortie. C'est pour cela qu'un relais à haute-sensibilité est préconisé pour ce projet. Il devrait consommer environ un tiers de courant en moins qu'un relais standard, c'est largement suffisant dans le cadre d'une démonstration. Souvenez-vous, je n'ai spécifié qu'un seul type de relais pour toutes les expériences de ce livre. Cependant, si vous avez l'intention d'installer ce circuit et voulez être absolument certain qu'il fonctionne correctement, même en fin de vie de votre pile de 9 V, remplacez ce relais par un modèle prévu pour une tension de 6 V. Le temporisateur ne risque pas vraiment de le suralimenter, car certains relais sont prévus pour tolérer les surtensions. Par exemple, la fiche technique du relais 6 V Omron G5V-2-H1-DC6 autorise une tension égale à 180 % de sa tension nominale. Comme toujours, la meilleure recommandation consiste à tester le circuit avec soin, considérer les alternatives, puis consulter les fiches techniques.

Sécurisation de l'ordinateur. Pour rendre ce projet plus sûr, vous pouvez retirer les vis qui referment le boîtier de l'ordinateur et les remplacer par des vis inviolables. Vous devrez, bien entendu, vous procurer les outils adaptés à ces vis afin de les mettre en place – ou les retirer si votre système ne fonctionne pas correctement.

Changement du codage. Une autre amélioration serait de faciliter le changement de la combinaison secrète, si vous en ressentez le besoin. Cela sera difficile si vous fabriquez une version soudée de ce circuit, mais vous pouvez installer des petits connecteurs et leurs supports connus sous le nom de « barrettes de connexion ».

Sécurité destructive. Pour les plus paranoïaques, il est possible de modifier le circuit pour qu'en cas de saisie d'un code erroné, un second relais de grande puissance fournisse une énergie suffisante pour faire fondre la CPU et détruire le disque dur. Dans le cas d'un disque SSD, il suffirait d'installer un relais « suicide » qui appliquerait une tension élevée sur l'entrée 5 V CC. Cependant, je ne recommanderai pas cela.

Il ne fait aucun doute que la destruction du matériel présente de nombreux avantages, en comparaison à l'effacement des données par un logiciel. C'est plus rapide, plus difficile à contrer et c'est irrémédiable. Si jamais un représentant de l'État venait chez vous pour vérifier la présence de fichiers illégaux sur votre ordinateur, il suffirait de lui donner un code erroné et d'attendre que la fumée âcre dégagée par les isolants en train de fondre apparaisse, ou l'émission d'un rayonnement gamma si vous avez choisi l'option nucléaire (figure 4-110).

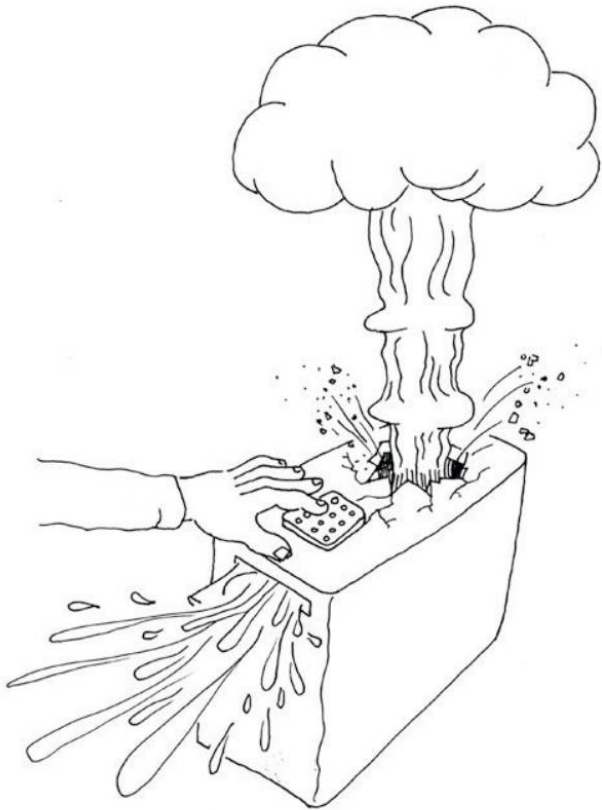


Figure 4-110. Pour ceux qui sont totalement paranoïaques, un système d'autodestruction contrôlé par un code secret apporte une protection renforcée contre le vol de données.

Soyons réalistes, aucun système n'est absolument sûr. Il en est de même d'un système de verrouillage matériel ; si quelqu'un parvient à le contrer (par exemple en réussissant à dévisser les vis inviolables, ou simplement en retirant votre clavier à code du boîtier de l'ordinateur à l'aide d'une cisaille), vous saurez, au moins, qu'il s'est passé quelque chose, en particulier si vous déposez un peu de peinture sur les vis, ce qui révélera toute tentative d'ouverture. En comparaison, si vous utilisez une protection logicielle par mot de passe et si quelqu'un parvient à le contrer, vous ne saurez peut-être jamais que votre système a été piraté.

Expérience 22 : une course de vitesse

Le projet suivant, utilisant des circuits logiques, va nous permettre d'aborder le concept de bouclage, dans lequel la sortie est renvoyée à l'entrée pour action – dans ce cas, pour la bloquer. C'est un projet modeste mais assez subtil, dont le principe vous sera très utile à l'avenir.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré logique 74HC32
- 2 temporisateurs 555
- 2 interrupteurs à glissière de type SPDT
- 2 interrupteurs tactiles
- 1 résistance de 220 Ω , 1 de 2,2K et 3 de 10K
- 2 condensateurs de 0,01 μF , 1 de 0,1 μF et 1 de 0,33 μF
- 1 régulateur de tension LM7805
- 2 LED génériques
- 1 LED à faible consommation

Objectif

Dans certains jeux télévisés comme *Jeopardy*, les candidats s'affrontent pour trouver la réponse à chaque question. La première personne qui appuie sur son bouton de réponse verrouille celui de ses adversaires. Comment pourrions-nous concevoir un circuit qui accomplisse cela ?

Vous trouverez sur Internet plusieurs sites proposant ce type de circuit, mais ils sont dépourvus de certaines fonctions qui me semblent indispensables. L'approche que je vais suivre ici est à la fois plus simple car est composé de peu de circuits intégrés et plus sophistiquée car il incorpore un « contrôle par le maître du jeu » qui le rend plus réaliste.

Je vais proposer quelques idées de base pour un jeu à deux joueurs. Après avoir développé ce concept, je vous montrerai comment l'étendre à quatre joueurs, ou même davantage.

Essai conceptuel

Voyons maintenant comment on peut faire évoluer ce projet. J'espère vous donner envie de développer vos propres idées dans le futur, c'est plus gratifiant que reproduire le travail de quelqu'un d'autre.

Examinons tout d'abord le concept de base : il y a deux joueurs, chacun disposant d'un bouton sur lequel appuyer, et le premier bloque l'autre participant.

Parfois, il est utile de visualiser ce type d'affirmation en dessinant un croquis. Sur la figure 4-111, le signal issu de chaque bouton traverse un composant imaginaire que j'appellerai « blocage du bouton », activé par le bouton de l'autre candidat. Je ne sais pas encore ce que sera cette partie du circuit, ni comment elle fonctionnera, mais elle devra être activée par le premier joueur et bloquer l'autre candidat.

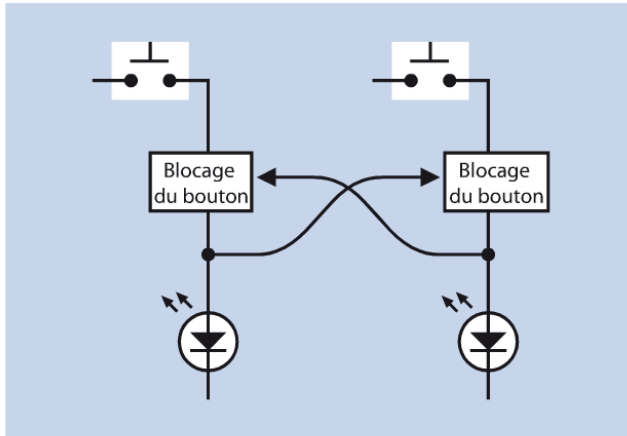


Figure 4-111. Principe de base : le premier qui agit bloque l'autre joueur.

En observant ce dessin, un problème apparaît. Si je veux l'étendre à trois joueurs, la situation va se compliquer, car chaque participant devra activer le « blocage de bouton » de ses deux adversaires. Le nombre de connexions va devenir difficile à maîtriser (figure 4-112).

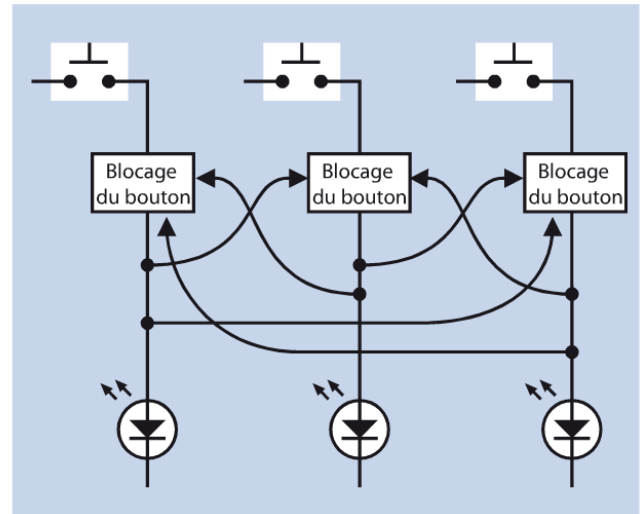


Figure 4-112. L'augmentation du nombre de participants de deux à trois double le nombre de connexions.

Un autre problème se pose : lorsqu'un joueur aura cessé d'appuyer sur son bouton, ceux des deux autres seront à nouveau débloqués. Il faut donc prévoir une bascule bistable, également nommée « verrou » (*latch* en anglais), comme dans les expériences 15, 19 et 21.

Si le bouton du joueur le plus rapide déclenche une bascule, son circuit reste alimenté et son bouton devient inopérant. Ainsi, la bascule bloque tous les boutons (figure 4-113) :

- Le premier joueur appuie sur son bouton.
- Son signal est verrouillé.
- Le signal ainsi verrouillé est réinjecté à l'entrée et bloque tous les boutons.

La configuration est maintenant modulaire et peut être étendue à presque n'importe quel nombre de joueurs, en ajoutant simplement davantage de modules, sans accroître la complexité.

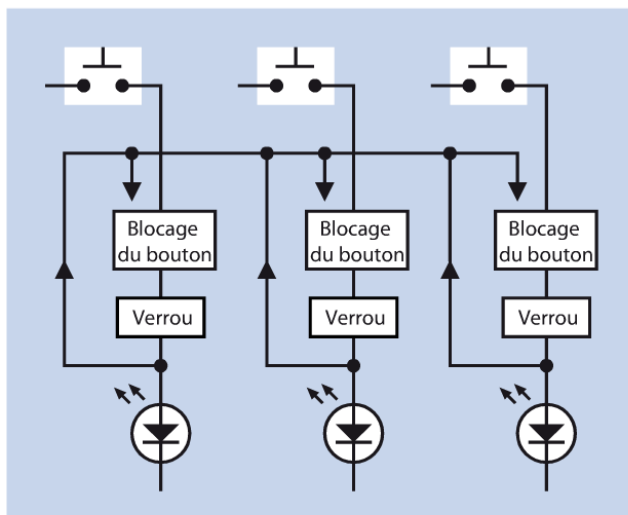


Figure 4-113. Une bascule verrou bloque maintenant tous les boutons.

Il manque cependant quelque chose d'essentiel : un bouton de réinitialisation, pour faire revenir le système au point de départ après le blocage. Il faut par ailleurs empêcher les joueurs d'appuyer trop tôt sur leurs boutons, avant que le maître du jeu n'ait terminé d'énoncer la question. Ces deux fonctions peuvent peut-être se combiner en une seule commande, sous le contrôle de l'animateur du jeu.

Dans la position Réinitialiser, l'interrupteur de l'animateur réinitialise le jeu et interrompt l'alimentation des boutons. Dans la position Jouer, l'interrupteur cesse de maintenir le jeu en position de réinitialisation et alimente les boutons. La figure 4-114 illustre ce cas avec deux joueurs, pour ne pas surcharger le schéma, mais on peut l'étendre facilement.

Je dois maintenant me confronter à un problème de logique sur le diagramme. Dans cette configuration, tout est interconnecté. Des flèches montrent la direction des signaux, mais je ne sais pas encore comment éviter que les signaux n'empruntent la mauvaise direction. Si je ne règle pas ce problème, le signal de chaque joueur allumera les deux LED. Comment y remédier ?

Je pourrais ajouter des diodes sur les connexions de retour, afin de les empêcher de véhiculer le signal dans l'autre sens. Cependant, une autre idée est plus élégante : ajouter une porte OU (OR), car les entrées d'une porte ET sont électriquement séparées (figure 4-115).

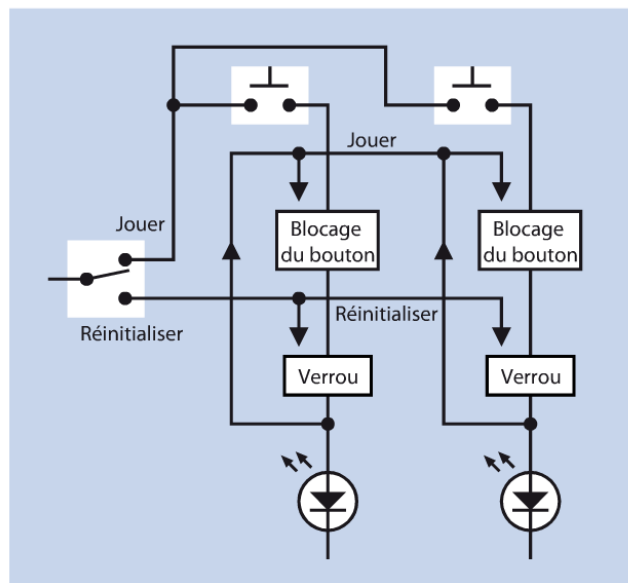


Figure 4-114. Un contrôle par l'animateur du jeu a été ajouté.

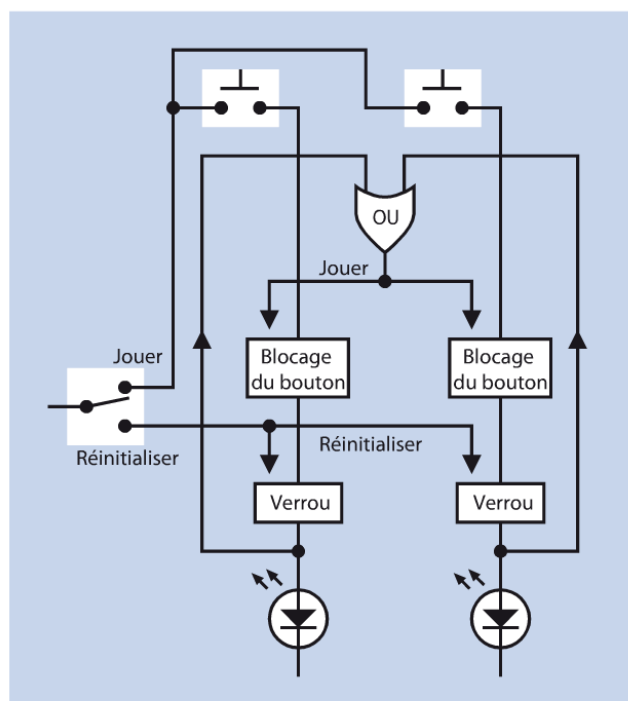


Figure 4-115. L'ajout d'une porte OU (OR) isole le circuit d'un joueur du circuit de l'autre.

Une porte OU ne possède que deux entrées logiques. Cela empêchera-t-il d'ajouter des joueurs ? Non, car il est possible de se procurer des portes OU à trois, quatre, ou même huit entrées. Si l'une d'entre elles est au niveau haut, la sortie est haute. S'il y a moins de joueurs que

d'entrées, il suffit d'ignorer les entrées inutilisées en les reliant à la masse.

Ce que j'ai appelé « blocage du bouton » est une autre porte logique. Elle devrait se comporter ainsi : « s'il n'y a qu'un signal provenant d'un bouton, je le laisse passer, mais si un signal provient d'un autre bouton, je le bloque ».

Avant de choisir les portes, il faut décider du choix de la bascule. Je peux me procurer une bascule activée par un signal et désactivée par un autre, mais les circuits intégrés contenant des bascules ont des fonctions supplémentaires à celles dont j'ai besoin pour ce circuit. Une fois de plus, je vais utiliser des temporisateurs 555 en mode bistable. Ils nécessitent peu de connexions, fonctionnent simplement et peuvent délivrer un courant suffisant pour piloter des LED lumineuses. Le seul problème est qu'ils nécessitent :

- un signal de déclenchement négatif pour créer une sortie haute ;
- un signal de réinitialisation négatif pour basculer sa sortie à l'état bas.

Chaque bouton devra donc produire une impulsion négative au lieu d'une impulsion positive pour répondre aux contraintes des temporisateurs.

La figure 4-116 propose un schéma simplifié. Je préfère représenter le brochage du temporisateur 555 selon la disposition réelle de ses broches, ce qui nécessite de repositionner les composants autour, pour réduire le croisement des fils.

Je n'ai pas assez de place pour faire figurer les symboles positif et négatif montrant l'état des broches des temporisateurs. C'est pourquoi j'ai utilisé un petit rond rouge pour indiquer une broche à l'état haut et un bleu pour indiquer un état bas. Les cercles noirs indiquent que la broche peut changer d'état. Les cercles blancs indiquent que l'état de ces broches n'est pas important et qu'elles peuvent rester non connectées.

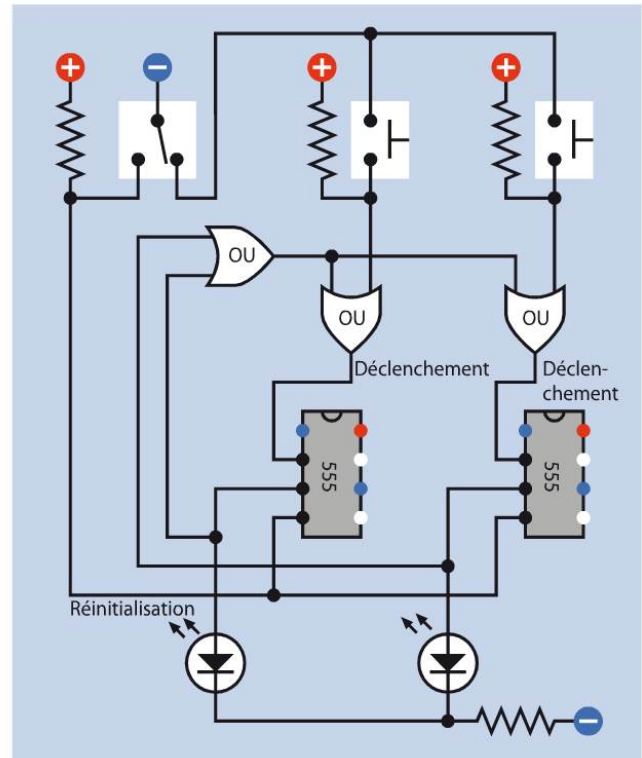


Figure 4-116. Diagramme logique préliminaire. Les broches en bleu sont au niveau bas, les rouges au niveau haut et les blanches ne sont pas importantes.

Avant le montage, examinons le fonctionnement théorique de ce circuit. La nécessité de fournir au temporisateur une transition négative à son entrée de déclenchement pour obtenir une sortie haute est la chose la plus importante à ne pas oublier. Cela signifie que, quand un joueur appuie sur son bouton, celui-ci doit propager un niveau bas dans le circuit. Cela n'est pas intuitif ; c'est pourquoi je le montre en quatre étapes sur les figures 4-117, 4-118, 4-119 et 4-120, expliquant le fonctionnement.

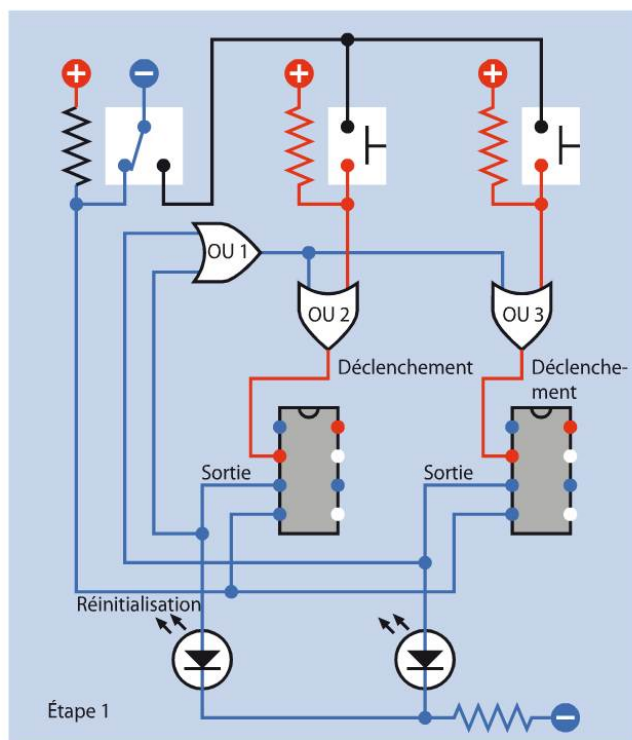


Figure 4-117. Première étape montrant le circuit en mode réinitialisation.

Durant la première étape, le commutateur de l'animateur est en position Réinitialisation. Le niveau bas appliqué aux broches de réinitialisation des temporisateurs force leurs sorties au niveau bas. Ces sorties maintiennent les LED éteintes et sont transmises aux entrées de la porte OU 1. Puisque ces dernières sont basses, la sortie l'est également, mais les portes OU 2 et OU 3 l'ignorent car leurs autres entrées sont au niveau haut, du fait de la présence des résistances de tirage à côté des boutons. Rappelez-vous que si l'une des entrées d'une porte OU est haute, sa sortie est également au niveau haut. Et, aussi longtemps que la broche de déclenchement d'un temporisateur bistable est au niveau haut, il ne se déclenche pas. Le circuit est donc stable.

Durant l'étape 2, l'animateur du jeu vient de poser la question et il bascule son commutateur vers la droite, fournissant un niveau bas aux boutons des joueurs. Aucun d'entre eux n'a encore répondu ; les résistances de tirage maintiennent le circuit stabilisé, grâce aux sorties basses des temporisateurs.

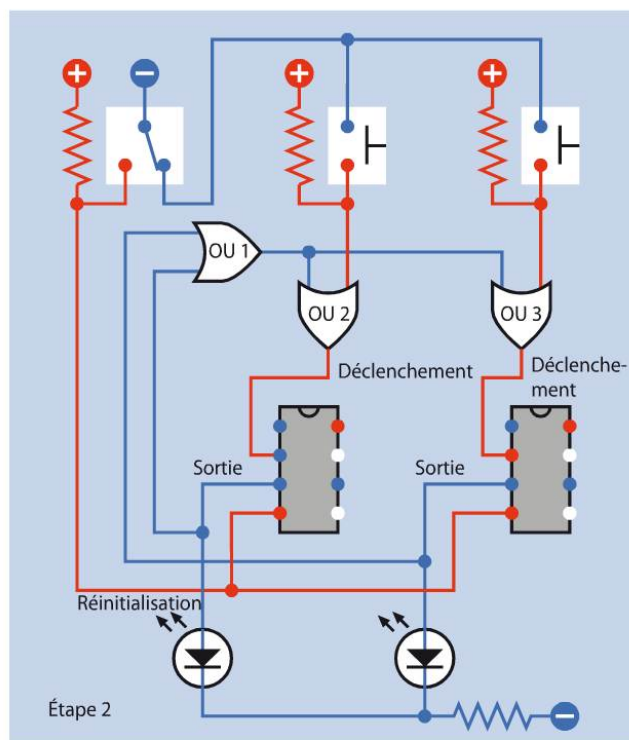


Figure 4-118. Deuxième étape. Les boutons des joueurs sont actifs, mais aucun n'a été enfoncé.

Durant l'étape 3, le joueur 1 a appuyé sur le bouton de gauche. Ceci transmet un niveau bas à la porte OU 2. Maintenant que les deux entrées de OU 2 sont au niveau bas, sa sortie passe également au niveau bas. Cette impulsion négative est transmise à la broche de déclenchement du temporisateur de gauche, mais les composants ne réagissent pas instantanément et le temporisateur n'a pas encore été déclenché par le signal.

Lors de l'étape 4, à peine une microseconde plus tard, le temporisateur a réagi au signal d'entrée, créant une sortie haute qui allume la LED et retourne à l'entrée de la porte OU 1. Sa sortie devient donc également haute. Cette sortie est transmise aux entrées de OU 2 et OU 3 dont les sorties deviennent hautes. Il en résulte que les deux temporisateurs ont leurs entrées de déclenchement au niveau haut. Ainsi, quel que soit le bouton sur lequel l'un des candidats aura appuyé, il n'aura aucun effet, car OU 1 continue de fournir un niveau haut au circuit.

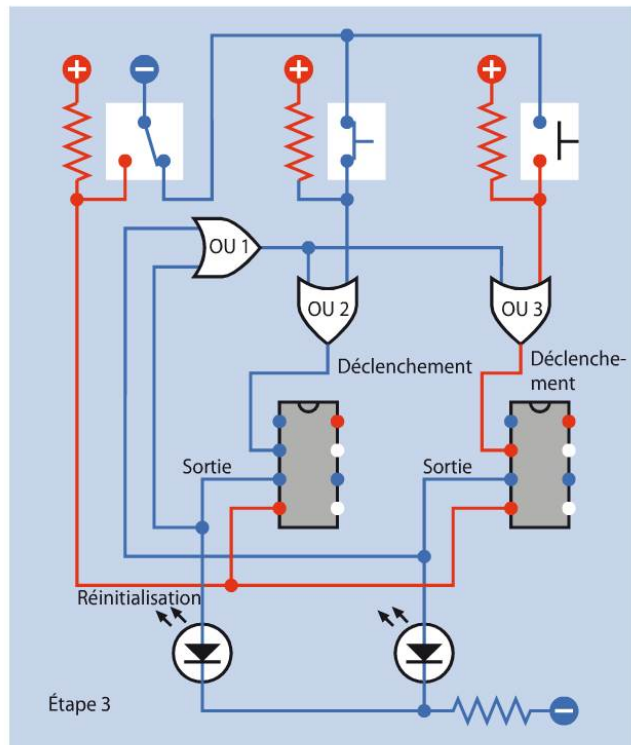


Figure 4-119. Troisième étape. Le joueur de gauche a appuyé sur son bouton, mais le temporisateur 555 n'a pas encore réagi.

- Quand un temporisateur 555 fonctionne en mode bascule bistable, un niveau bas sur sa broche de déclenchement provoque son basculement et sa sortie devient haute et le demeure, même si sa broche de déclenchement repasse au niveau haut.
- L'application d'une impulsion de niveau bas sur sa broche de réinitialisation est la seule façon de repasser la sortie d'un temporisateur 555 au niveau bas.

Il n'y a qu'une seule situation qui pourrait perturber ce fonctionnement. Que se passe-t-il si les deux joueurs appuient absolument simultanément sur leur bouton ? En électronique digitale, cela est peu probable. Toutefois, si cela arrive, les deux LED s'allument, indiquant qu'il y a match nul.

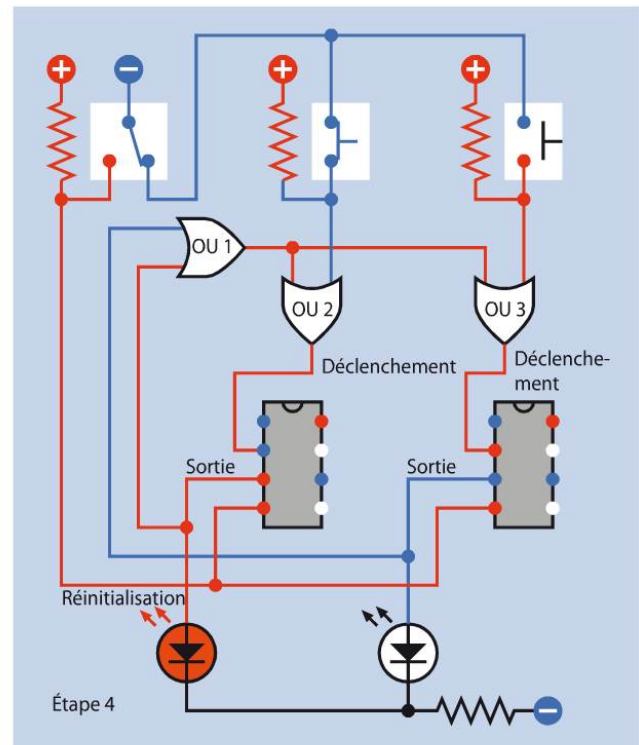


Figure 4-120. Quatrième étape. L'action provoquée par le joueur de gauche s'est propagée dans le circuit et bloque maintenant le joueur de droite.

Pour vous montrer comment le circuit prévu pour deux joueurs peut être étendu à d'autres joueurs, j'ai représenté le schéma simplifié d'un circuit prévu pour trois joueurs sur la figure 4-121. Le circuit pourrait être étendu à l'infini, la seule limite étant le nombre d'entrées disponibles sur la porte OU 1.

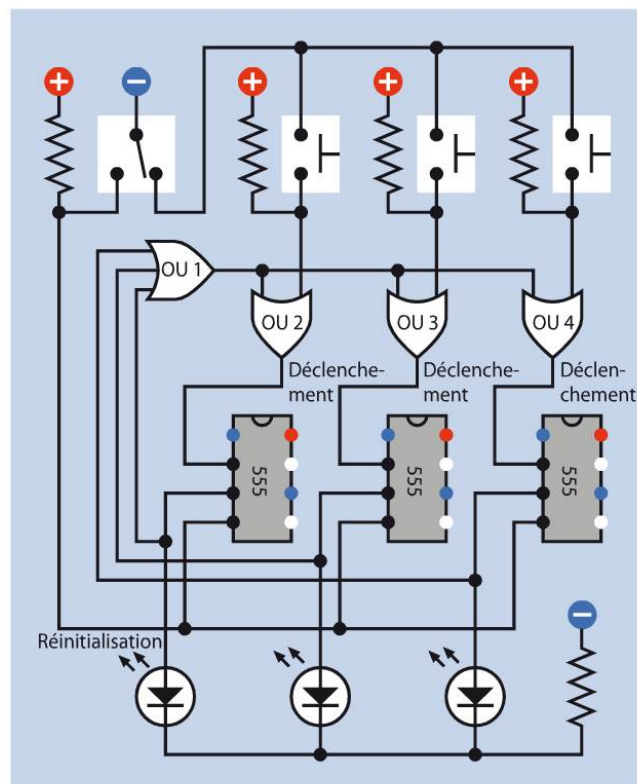


Figure 4-121. Le circuit a été facilement étendu à trois joueurs.

Réalisation sur plaque de montage

Le schéma de la figure 4-122 est aussi proche que possible de la disposition réelle, en utilisant une porte OU. Le plan de la platine d'essai est représenté sur la figure 4-123 et les valeurs des composants sur la figure 4-124.

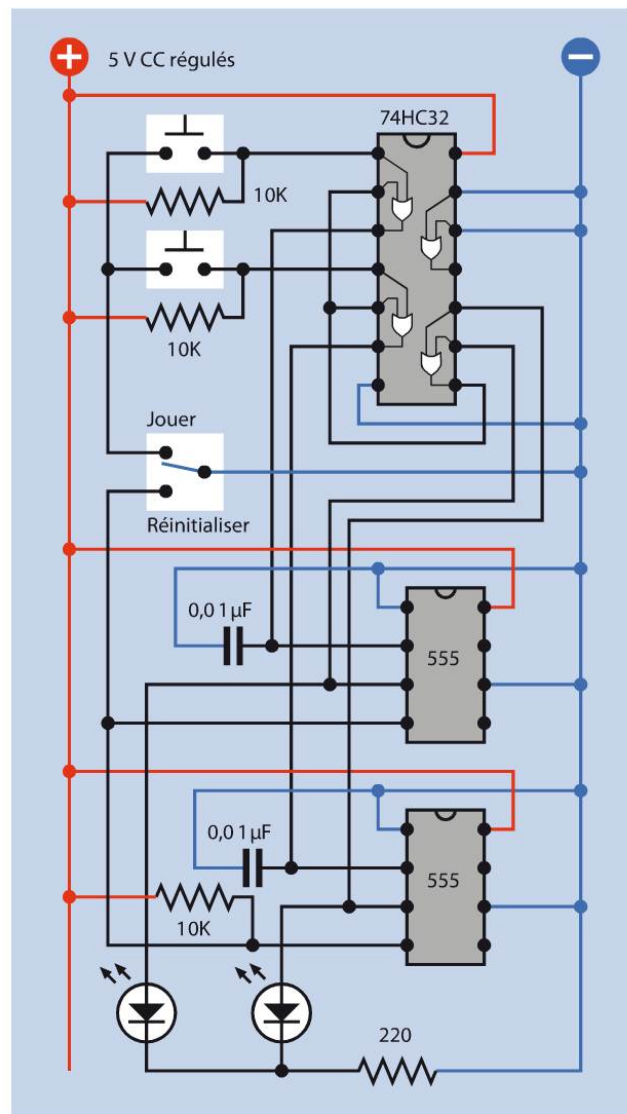


Figure 4-122. Le schéma redessiné de la version à deux joueurs utilisant une porte OU à quatre entrées.

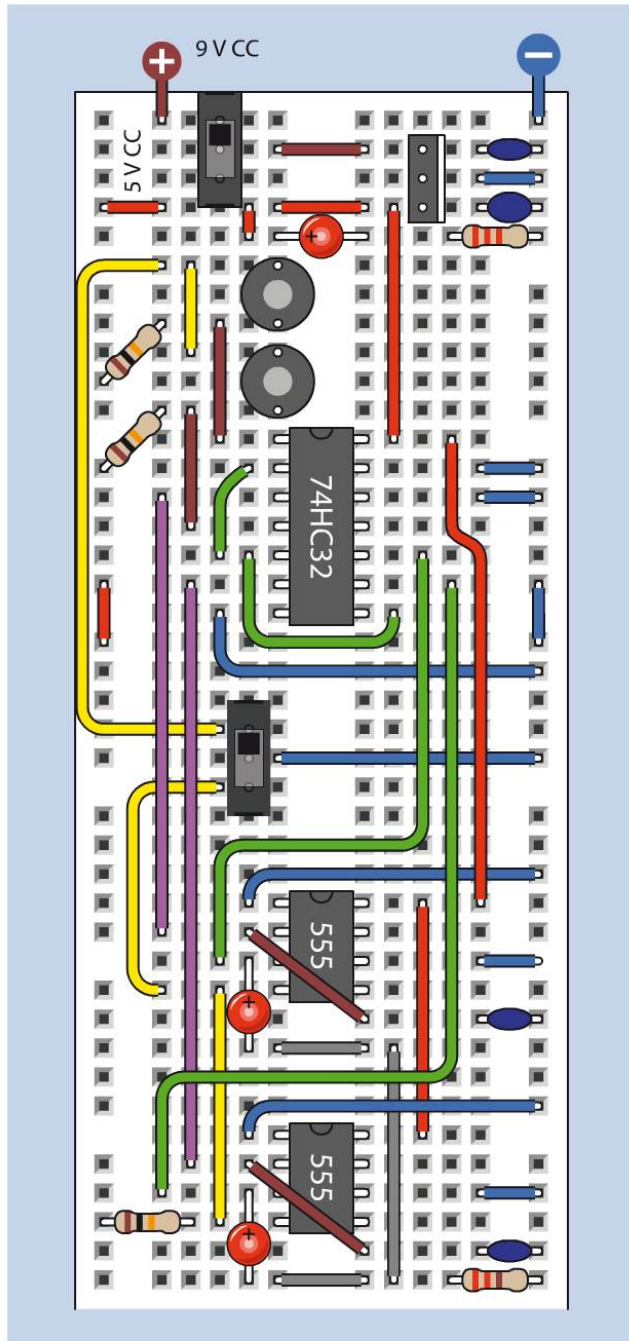


Figure 4-123. Plan de la plaque de montage équivalent au schéma précédent.

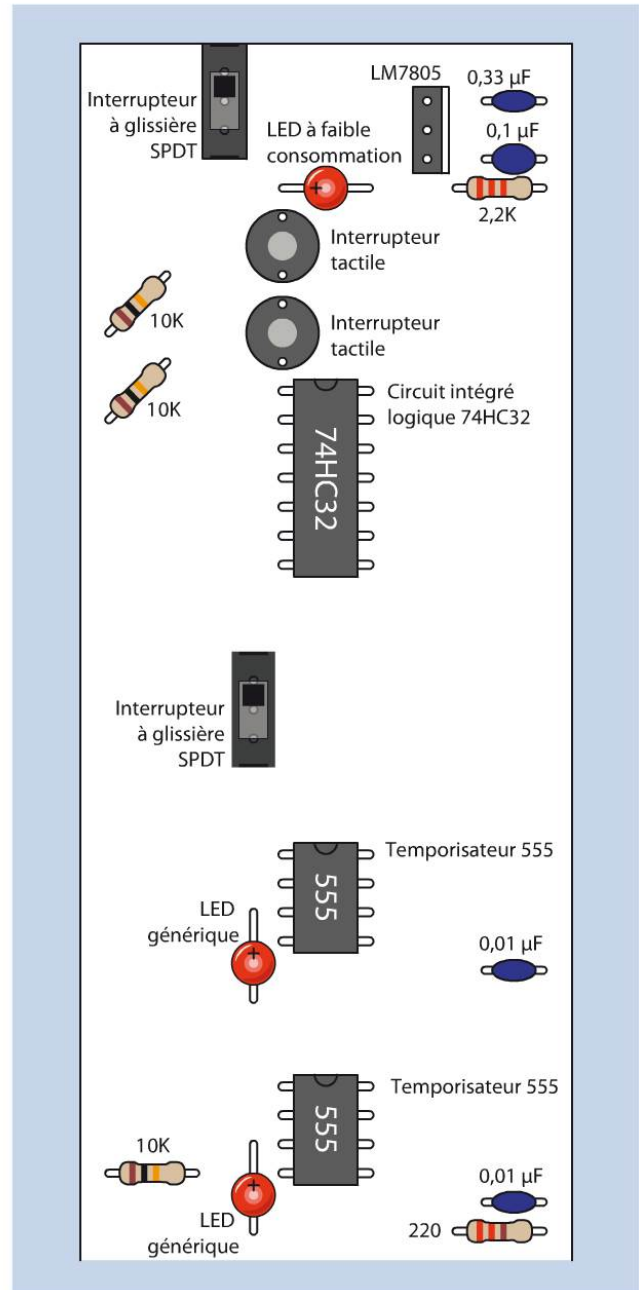


Figure 4-124. Valeurs des composants de la platine de montage.

Comme toutes les portes utilisées sont de type OU et qu'il n'y en a que trois, je n'ai besoin que d'un seul circuit intégré 74HC32, qui contient quatre portes OU à deux entrées. Les entrées de la quatrième porte sont reliées à la masse. Les deux portes à gauche du circuit intégré sont OU 2 et OU 3 et la porte en bas et à droite, OU 1, reçoit sur ses entrées

les signaux de la broche 3 de chaque temporisateur 555. Si vous avez tous les composants, vous devriez pouvoir monter le circuit et le tester rapidement.

Vous remarquerez que j'ai ajouté un condensateur de $0,01\ \mu\text{F}$ entre la masse et la broche 2 (l'entrée) de chaque temporisateur. En effet, quand j'ai testé le circuit sans ces condensateurs, j'ai constaté que les temporisateurs avaient tendance à se déclencher lorsque le commutateur de l'animateur était manipulé, sans que quiconque appuie sur un bouton. C'était probablement en réponse aux « rebonds » du commutateur de l'animateur (petites vibrations rapides des contacts quand le commutateur est manœuvré), car les condensateurs ont résolu le problème. Ils retardent légèrement la réponse des 555, mais pas suffisamment par rapport à la lenteur des réflexes humains.

Quant aux boutons, il importe peu qu'ils « rebondissent », car chaque temporisateur se verrouille à la première impulsion reçue et ignore les hésitations suivantes.

Vous pouvez tester le circuit en déconnectant les condensateurs de $0,01\ \mu\text{F}$ et en manœuvrant le commutateur à glissière de l'animateur une douzaine de fois. En utilisant un petit interrupteur peu coûteux, vous observerez probablement des déclenchements intempestifs. Dans la prochaine expérience, je développerai cette notion de rebonds et nous verrons comment les éliminer.

Améliorations

Après avoir réalisé le montage du circuit sur une platine d'essai, si vous décidez de le réaliser de façon permanente, je vous suggère de l'étendre à trois ou quatre participants. Cela va nécessiter une porte OU capable de recevoir quatre entrées. Le 74HC4078 est un bon choix, car il en propose huit. Pensez simplement à relier les entrées inutilisées à la masse.

Alternativement, si vous avez une paire de circuits intégrés 74HC32 et si vous ne souhaitez pas vous procurer un 74HC4078, vous pouvez associer trois des portes d'un 74HC32 afin qu'elles se comportent comme une porte à quatre entrées. Le diagramme logique très simple de la figure 4-126 montre trois portes OU, souvenez-vous que la sortie de chaque OU sera haute si au moins l'une de ses entrées est au niveau haut.

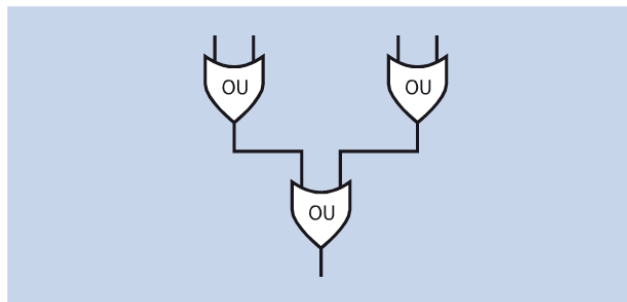


Figure 4-125. Trois portes OU à deux entrées simulant une porte OU à quatre entrées.

Pendant que vous réfléchissez à cela, pouvez-vous imaginer comment combiner trois portes ET (AND) à deux entrées pour qu'elles se comportent comme une porte ET à quatre entrées ?

Pour un jeu à quatre joueurs, vous aurez besoin de deux temporisateurs 555 supplémentaires et, bien entendu, de deux LED et deux boutons additionnels.

Je vous laisse le soin de créer le schéma du jeu à quatre joueurs en commençant par dessiner une version simplifiée, avec uniquement les symboles logiques. Convertissez ensuite ce diagramme en un plan sur plaque d'essai, ce qui est le plus difficile. Au début, tracez votre circuit sur une feuille de papier, ce sera à mon avis plus rapide qu'avec un logiciel.

Expérience 23 : hésitations et rebonds

Nous avons déjà utilisé des temporisateurs 555 en mode bistable dans trois expériences. À présent, il est temps de faire appel à de vraies bascules et d'en expliquer le fonctionnement. Je vais également vous montrer comment traiter le problème évoqué dans l'expérience précédente : les rebonds d'un interrupteur.

Quand un interrupteur est basculé d'une position à l'autre, ses contacts vibrent très rapidement. Ce sont les rebonds. Ils sont problématiques dans les circuits comportant des composants digitaux qui réagissent si rapidement qu'ils interprètent la moindre petite vibration comme un signal d'entrée. Si vous reliez un bouton-poussoir à l'entrée d'un compteur, celui-ci peut décompter 10 impulsions, voire plus, à partir d'un seul appui sur le bouton-poussoir (figure 4-126).

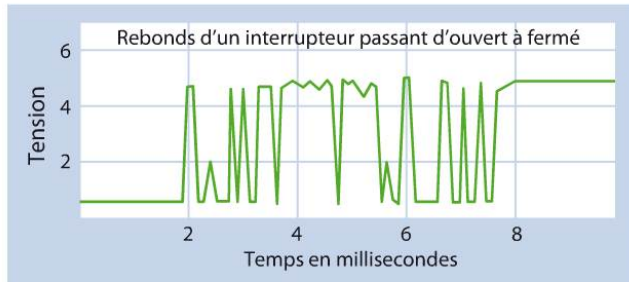


Figure 4-126. Variations provoquées par les vibrations des contacts d'un interrupteur qui se ferme (document issu d'une fiche technique du fabricant Maxim Integrated Corporation).

Il existe de nombreuses techniques pour supprimer les rebonds d'un interrupteur, mais l'utilisation d'une bascule bistable est sans doute la plus fondamentale.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré logique 74HC02 et 1 74HC00
- 2 interrupteurs à glissière
- 3 LED à faible consommation
- 2 résistances de 680 Ω , 2 de 10K et 1 de 2,2K
- 1 condensateur de 0,1 μF et 1 de 0,33 μF
- 1 régulateur de tension LM7805

Assemblez les composants sur votre plaque de montage, selon la figure 4-128. La figure 4-129 représente le schéma du circuit et la figure 4-130 les valeurs des composants. Quand vous alimentez le circuit, une des LED situées en bas doit s'allumer.

Je souhaite maintenant que vous fassiez quelque chose d'étrange. Veuillez déconnecter le fil identifié A sur la figure 4-127. Si vous vous référez au schéma de la figure 4-128, vous verrez que vous avez retiré la liaison allant au pôle de l'interrupteur, laissant les deux portes NON-OU (NOR) reliées uniquement par leurs résistances de rappel.

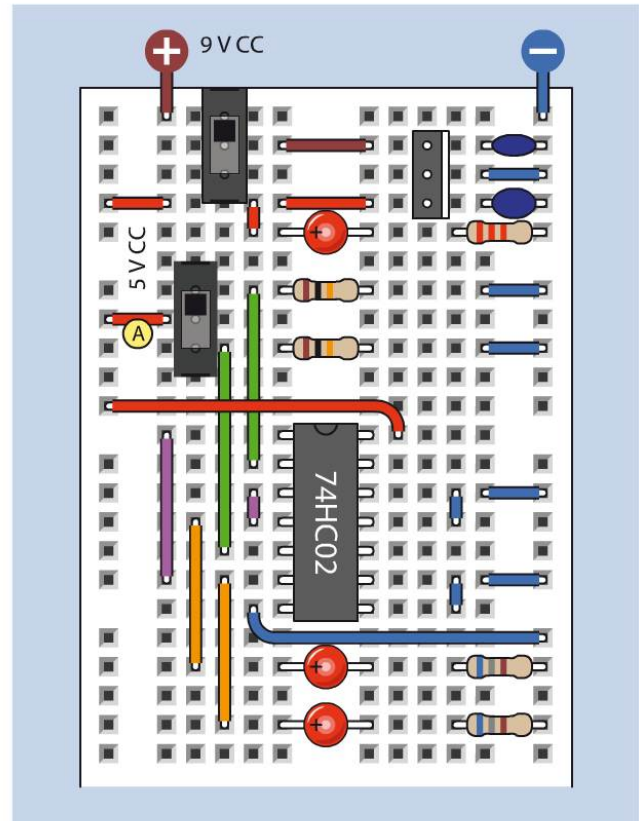


Figure 4-127. Circuit de la bascule bistable réalisé sur une plaque de montage.

Vous serez alors surpris de constater que la LED reste allumée.

Remettez le fil en place sur la plaque d'essai, basculez l'interrupteur en position opposée ; la première LED devrait s'éteindre et l'autre s'allumer. Retirez à nouveau le fil et constatez que la LED reste allumée.

Voici ce qu'il faut retenir :

- Une bascule bistable (flip-flop) n'a besoin que d'une impulsion initiale d'entrée – émise par exemple par un interrupteur.
- Après cette impulsion, elle ignore ce qui se passe à cette entrée.

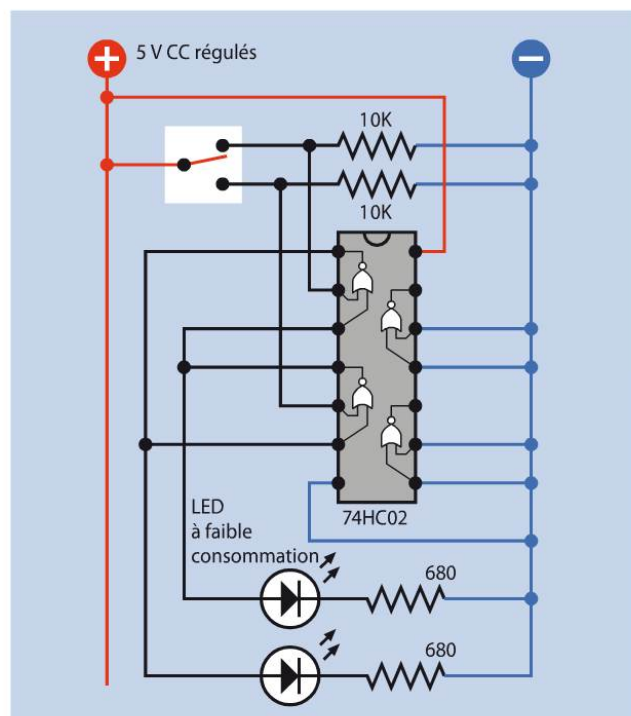


Figure 4-128. Bascule bistable utilisant des portes NON-OU (NOR).

Comment ça marche ?

Deux portes NON-OU, ou deux portes NON-ET (NAND) peuvent se comporter en bascule bistable (flip-flop).

- Utilisez des portes NON-OU quand un interrupteur inverseur délivre un niveau haut.
- Utilisez des portes NON-ET quand un interrupteur inverseur délivre un niveau bas.

Dans les deux cas, vous devez utiliser un interrupteur inverseur à deux positions.

À trois reprises, j'ai mentionné l'interrupteur inverseur car la plupart des ouvrages ne mettent généralement pas l'accent sur ce point. Quand j'ai commencé l'électronique, j'avais un mal fou à comprendre comment deux portes NON-OU ou NON-ET parvenaient à éliminer les rebonds d'un simple interrupteur SPST, jusqu'à ce que je réalise que ce n'était pas possible. Car lorsque vous mettez le circuit sous tension, les portes NON-OU (ou NON-ET) doivent savoir dans quel état commencer. Leur position initiale dépend de celle de l'interrupteur. Un simple bouton-poussoir SPST ne peut pas le signaler s'il n'est pas enfoncé. C'est pourquoi vous devez utiliser un interrupteur à deux positions (inverseur).

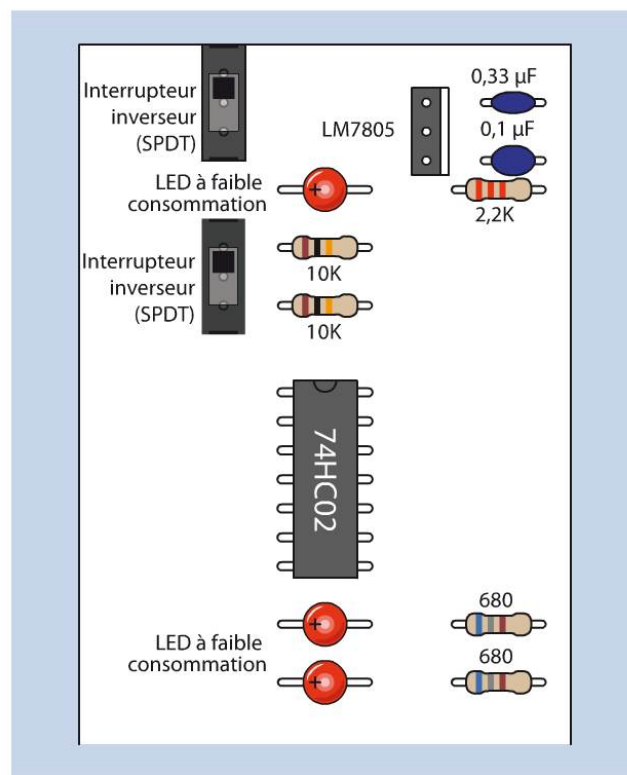


Figure 4-129. Valeurs des composants du montage de la bascule constituée de portes NON-OU.

Suppression des rebonds par des portes NON-OU (NOR)

Les figures 4-130 et 4-131 montrent un circuit en deux étapes, afin de mettre en évidence les changements qui interviennent dans le circuit utilisant deux portes NON-OU, quand l'inverseur change de position. J'ai aussi inclus une table de vérité montrant les sorties des portes NON-OU pour chaque combinaison de leurs entrées (figure 4-132).

Commencez par vous reporter à la figure 4-130. Durant la première étape, l'interrupteur transmet une tension positive à la partie la plus à gauche du circuit, forçant le niveau bas apporté par la résistance de rappel, ce qui assure qu'une des entrées de la porte NON-OU de gauche est au niveau haut. Comme une seule entrée haute suffit à obtenir une sortie basse (figure 4-132), le niveau bas parvient à la porte NON-OU de droite dont les deux entrées sont maintenant au niveau bas, ce qui lui permet de délivrer une sortie de niveau haut. Cette sortie repart en direction de la porte NON-OU de gauche. Dans cette configuration, tout est stable.

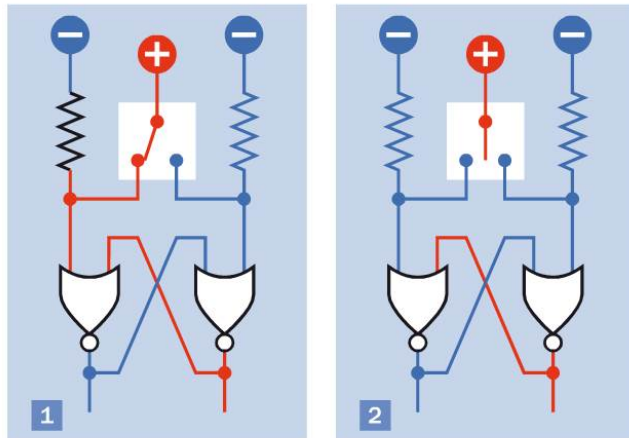


Figure 4-130. Quand l'inverseur passe par la position intermédiaire neutre, l'état des portes NON-OU ne change pas.

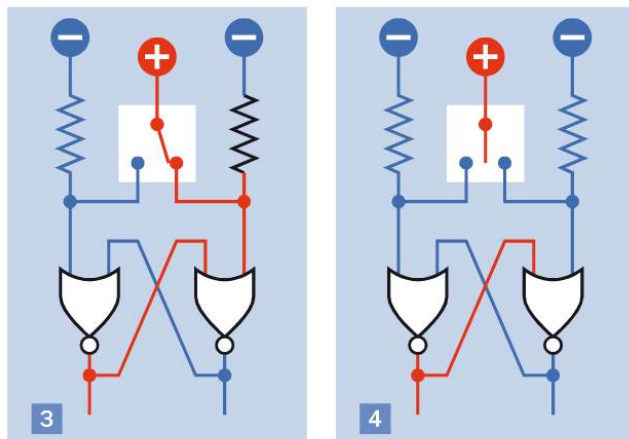


Figure 4-131. Après que l'état des portes NON-OU a été inversé, il demeure stable quand l'inverseur repasse par la position intermédiaire neutre.

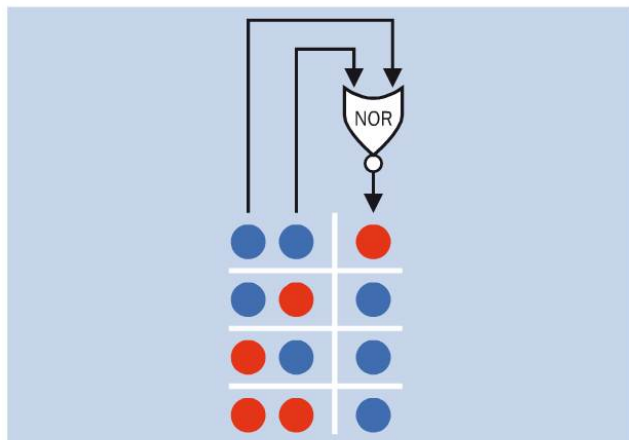


Figure 4-132. Rappel de la table de vérité d'une porte NON-OU (NOR).

Voici maintenant le passage le plus intéressant.

Supposons que vous déplaciez l'interrupteur pour qu'il ne ferme aucun de ses contacts. Ou bien, supposons que son contact rebondisse et n'établisse pas correctement la fermeture du circuit, ou que vous ayez déconnecté totalement l'interrupteur. Ne recevant plus la tension positive de la part de l'interrupteur, l'entrée la plus à gauche de la bascule NON-OU de gauche passe au niveau bas, en raison de la résistance de rappel. Mais l'entrée de droite de cette porte est toujours au niveau haut et comme une seule entrée haute suffit pour que la porte NON-OU maintienne sa sortie négative, rien ne change. Autrement dit, le circuit s'est stabilisé dans cet état, même si l'interrupteur n'est plus fermé.

Si l'interrupteur est basculé à droite (figure 4-132) et fournit un niveau haut à l'entrée la plus à droite de la porte NON-OU de droite, cette dernière reconnaît instantanément qu'elle possède une entrée logique positive et, en conséquence, modifie sa sortie logique en sortie négative. Celle-ci atteint l'autre porte NON-OU, qui a désormais deux entrées négatives et dont la sortie devient positive. Cette sortie retourne vers la porte NON-OU de droite et le circuit se stabilise dans cet état.

De cette façon, l'état de sortie des deux portes NON-OU a été inversé. Elles ont basculé dans cet état, même si le contact de l'interrupteur est rompu, comme dans l'étape 4.

Si un interrupteur rebondit si fort que son pôle se relie alternativement aux deux contacts opposés, ce circuit ne fonctionnera pas. Il ne fonctionne que si l'interrupteur oscille entre un contact et aucun contact. C'est généralement le cas avec un interrupteur SPDT.

Élimination des rebonds avec des portes NON-ET

Les dessins des figures 4-133 et 4-134 montrent une séquence similaire d'événements se produisant si vous utilisez un inverseur délivrant un niveau bas et deux portes NON-ET (NAND). Le comportement d'une telle porte est rappelé sur la figure 4-135.

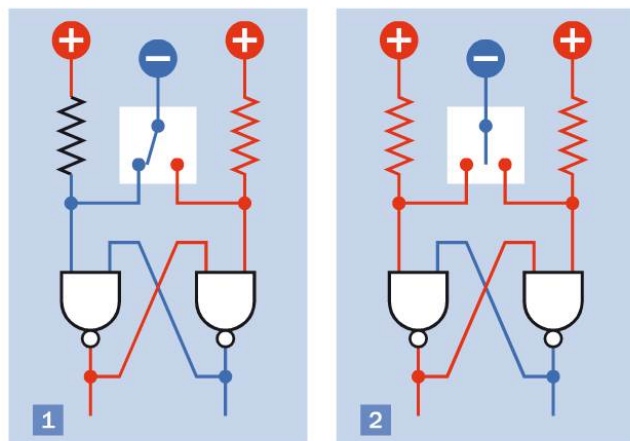


Figure 4-133. Deux portes NON-ET peuvent être utilisées comme bascule bistable, avec deux résistances de tirage et un inverseur délivrant un niveau bas.

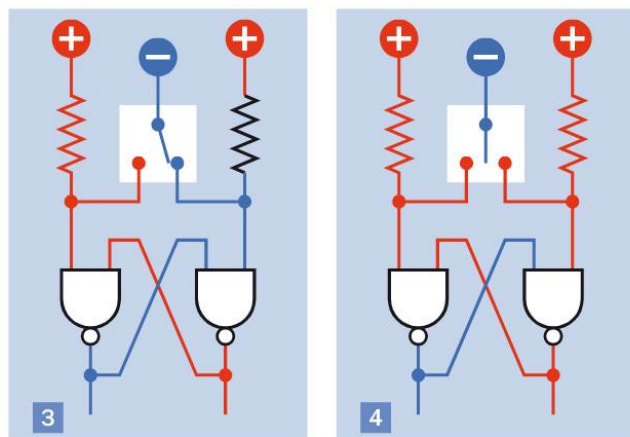


Figure 4-134. À nouveau, l'état des portes demeure inchangé quand l'inverseur est déconnecté de l'une ou de l'autre.

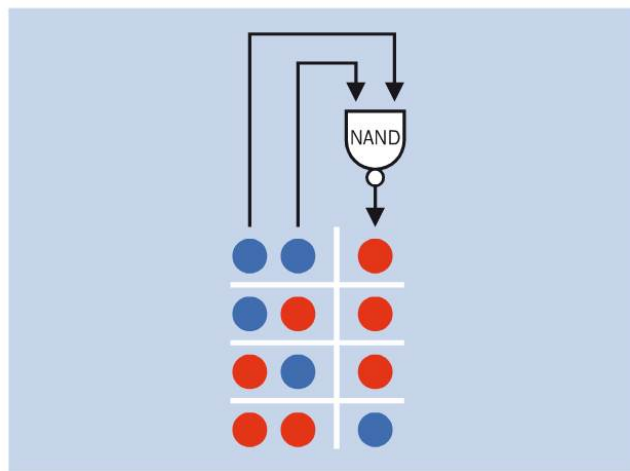


Figure 4-135. Rappel de la table de vérité d'une porte NON-ET.

Si vous souhaitez vérifier le fonctionnement du circuit NON-ET, utilisez votre circuit intégré 74HC00 pour faire un test. Attention cependant : les portes NON-OU et les portes NON-ET des deux circuits intégrés sont inversées. Vous devrez déplacer quelques connexions de votre platine de montage, car les deux circuits intégrés ne sont pas interchangeables. Reportez-vous aux figures 4-82 et 4-94 pour voir leurs spécifications.

Circuit asynchrone et circuit synchrone

Les circuits composés de portes NON-OU et NON-ET sont un exemple de circuits asynchrones, appelés ainsi car l'interrupteur les force à répondre immédiatement et sauter d'un état à l'autre. Vous pouvez utiliser ce circuit à chaque fois que vous souhaitez éliminer les rebonds d'un interrupteur (s'il s'agit d'un interrupteur inverseur).

Une version plus sophistiquée du circuit utilise des bascules synchrones, qui exigent de définir au préalable l'état de chacune de leurs entrées avant de leur envoyer un signal d'horloge pour provoquer la réaction de la bascule. L'impulsion d'horloge doit être très propre et précise, ce qui signifie que si vous la générez grâce à un interrupteur, vous devrez supprimer ses rebonds avec un autre circuit à bascule synchrone ! Si vous souhaitez en apprendre davantage au sujet des bascules, vous pouvez vous reporter à *L'Électronique en pratique 2*.

Comment supprimer les rebonds d'un interrupteur ou d'un bouton-poussoir non inverseur ? En fait, c'est un vrai problème ! Une des solutions consiste à utiliser un circuit intégré spécialisé pour cette fonction, comme le 4490 « éliminateur de rebonds », qui contient un circuit retardateur digital. Une référence spécifique est le MC14490 de On Semiconductor. Ce circuit intégré contient six circuits pour six entrées séparées, chacune possédant une résistance de tirage. Il est cependant particulièrement coûteux : environ 10 fois le prix d'un 74HC02 contenant des portes NON-OU. Vous vous faciliterez la tâche en utilisant uniquement des interrupteurs inverseurs (ou boutons-poussoir) dont les rebonds sont plus faciles à éliminer.

Vous pouvez également utiliser un temporisateur 555 connecté en mode bistable. Ma préférence pour cette possibilité a maintenant plus de sens.

Le condensateur et les résistances que j'ai spécifiés avec le temporisateur permettent de le faire fonctionner à environ 0,75 Hz. En d'autres termes, entre le début d'une impulsion et le début de la suivante, il s'écoulera un peu plus d'une seconde. Vous pourrez le constater en regardant la LED jaune reliée à la sortie du temporisateur, si la LED ne se comporte pas de cette façon, c'est probablement à cause d'une erreur de câblage.

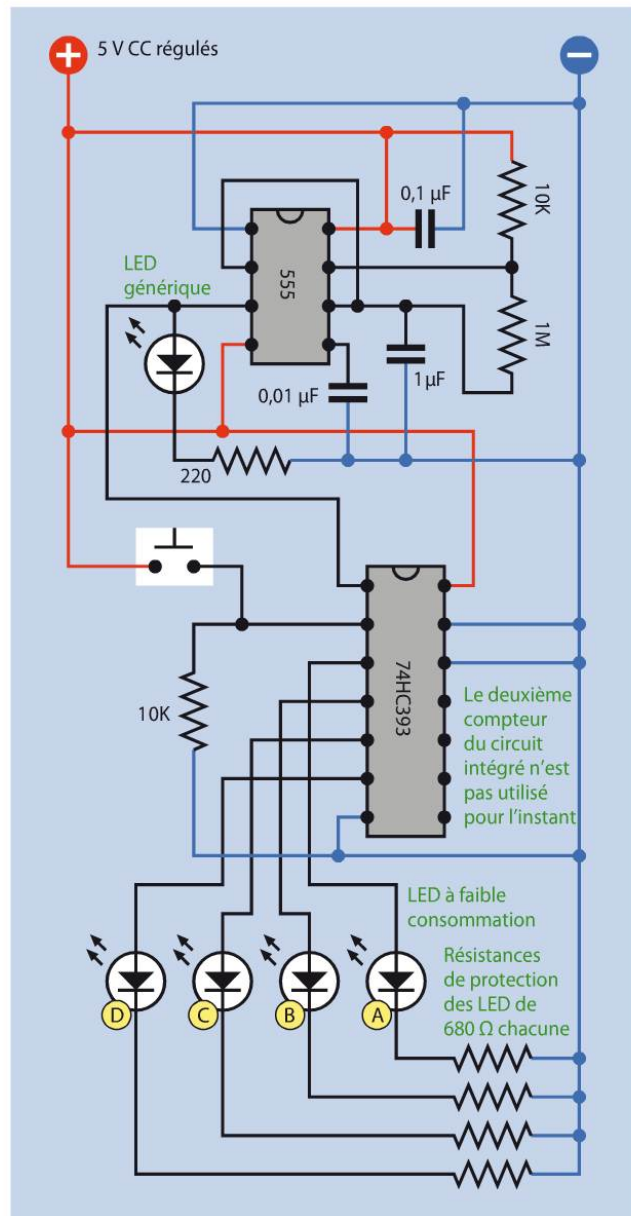


Figure 4-137. Schéma montrant la sortie et la fonction de réinitialisation d'un compteur binaire 74HC393.

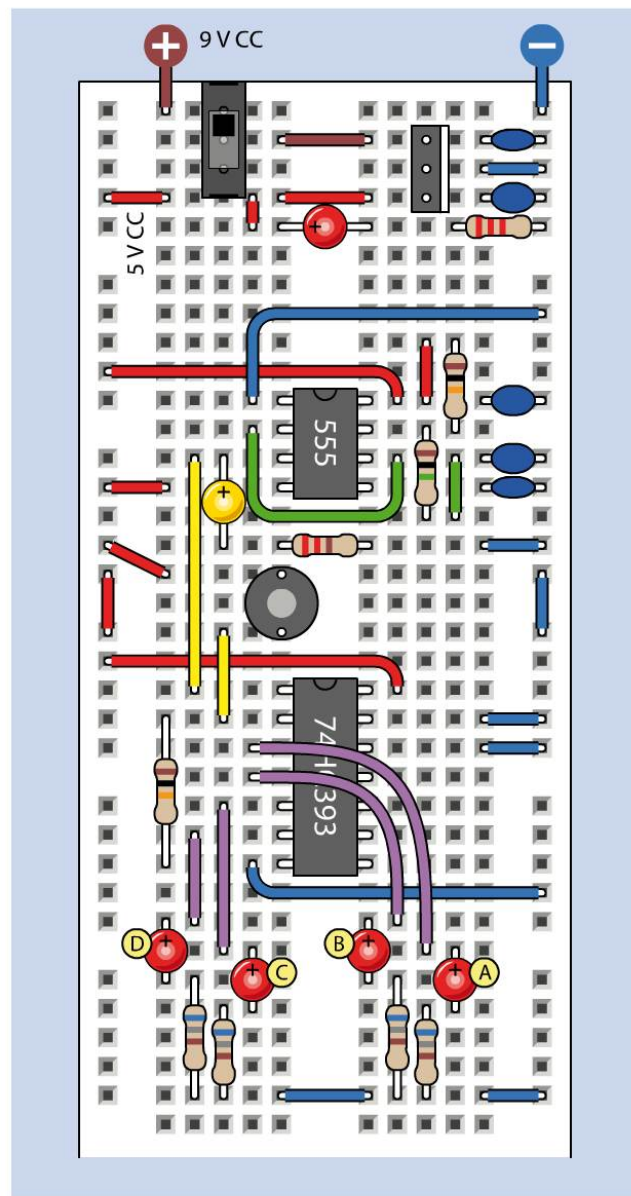


Figure 4-138. Le circuit de test réalisé sur une plaque de montage.

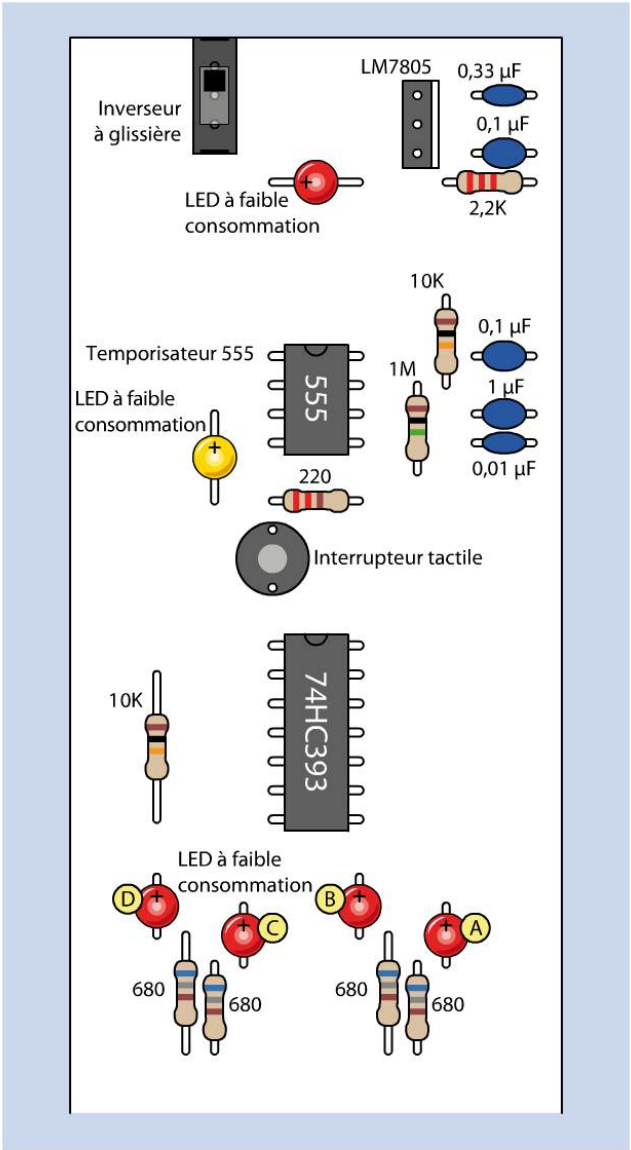


Figure 4-139. Valeurs des composants du circuit sur la plaque de montage.

Les quatre LED marquées A, B, C et D affichent l'état des sorties du compte. Si vos connexions sont correctes, elles devraient s'allumer selon la séquence de la figure 4-140, dans laquelle un rond noir indique qu'une LED est éteinte et un rond rouge indique qu'elle est allumée.

	D	C	B	A
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Figure 4-140. Séquence complète des sorties d'un compteur binaire.

Pour la suite de l'expérience, il vous sera très utile d'avoir quelques notions d'arithmétique binaire et d'arithmétique décimale. Une grande diversité de circuits intégrés tels que les décodeurs, les encodeurs, les multiplexeurs et les registres à décalage utilisent le calcul binaire. Et c'est bien entendu fondamental dans pratiquement tous les calculateurs numériques qui ont été réalisés.

Fondamentaux : le code binaire

Sur la figure 4-140, à chaque fois que la LED de la colonne A s'éteint, celle de la colonne B change d'état. À chaque fois que la LED de la colonne B s'éteint, elle inverse l'état de celle de la colonne C, et ainsi de suite. La conséquence de cette règle est que chaque LED clignote deux fois plus rapidement que celle qui est située à sa gauche.

Chaque ligne du tableau représente un *nombre binaire*, c'est-à-dire un nombre écrit uniquement en utilisant les chiffres 0 et 1 (figure 4-140). La valeur décimale équivalente est inscrite en chiffres noirs à gauche. Les LED peuvent être considérées comme des *chiffres binaires*, également appelés *bits*.

La règle pour compter en binaire est très simple. Dans la colonne la plus à droite, on commence par 0, puis on ajoute 1. Comme on ne peut utiliser que les chiffres 0 et 1, lorsqu'on doit ajouter 1, on revient à 0 et mettre une retenue dans la colonne de gauche suivante.

Et si le chiffre de la colonne de gauche est déjà 1 ? Il redevient 0 et une retenue est reportée dans la colonne de gauche suivante, et ainsi de suite.

La LED la plus à droite représente le *bit le moins significatif* (*least significant bit*). La LED la plus à gauche représente le *bit le plus significatif* (*most significant bit*).

Front montant ou front descendant

Quand vous effectuez le test, notez que chaque transition de la LED la plus à droite (d'allumée à éteinte ou l'inverse) se produit lorsque la LED jaune s'éteint. Pourquoi en est-il ainsi ?

Pour la plupart, les compteurs sont déclenchés par un front, ce qui signifie que le front montant ou le front descendant d'une impulsion incrémente le compteur à la valeur suivante, dès que cette impulsion est appliquée à son entrée d'horloge. Le clignotement des LED montre clairement que le 74HC393 réagit à un front descendant. Dans l'expérience 19, nous avons utilisé un compteur qui était déclenché par un front montant. Le type de compteur à utiliser dépend de votre application.

Le compteur 74HC393 possède également une broche de réinitialisation, tout comme le circuit intégré 4026B de l'expérience 19.

- Certaines fiches techniques décrivent la broche de réinitialisation comme *réinitialisation maître* (*master reset* en anglais, abrégé *MR*).
- Certains fabricants appellent la broche de réinitialisation *clear* (*effacement*, abrégé *CLR*).
- Quelle que soit l'appellation de la broche de réinitialisation, son action est la même : elle force les sorties du compteur à la valeur binaire 0000.

La broche de réinitialisation nécessite une impulsion séparée, mais la remise à zéro se produit-elle au début de l'impulsion ou à la fin ?

Si vous réalisez le circuit avec précaution, la broche de réinitialisation est maintenue au niveau bas par une résistance de rappel de 10K. Un interrupteur tactile relie directement au pôle positif de l'alimentation, ce qui prévaut sur la résistance de rappel de 10K et impose un niveau haut à la broche de réinitialisation.

Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur tactile, toutes les sorties s'éteignent jusqu'à ce que vous relâchiez cet interrupteur. De toute évidence, la fonction de réinitialisation du 74HC393 est déclenchée et maintenue par un niveau haut.

Le modulo

Retirez l'alimentation du circuit, déconnectez la résistance de rappel et l'interrupteur tactile de l'entrée de réinitialisation (broche 2), puis placez le fil comme indiqué sur la figure 4-141. Toutes les autres liaisons ont été grisées. Le nouveau fil, représenté en noir, relie le quatrième bit de la sortie D à la broche de réinitialisation. La nouvelle version du circuit est représentée sur la figure 4-142, avec la nouvelle liaison en vert.

Selon vous, que va-t-il se passer ?

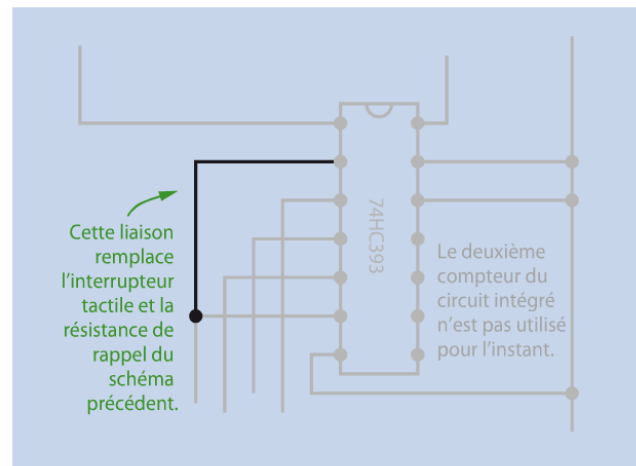


Figure 4-141. Ajout d'une remise à zéro automatique au compteur.

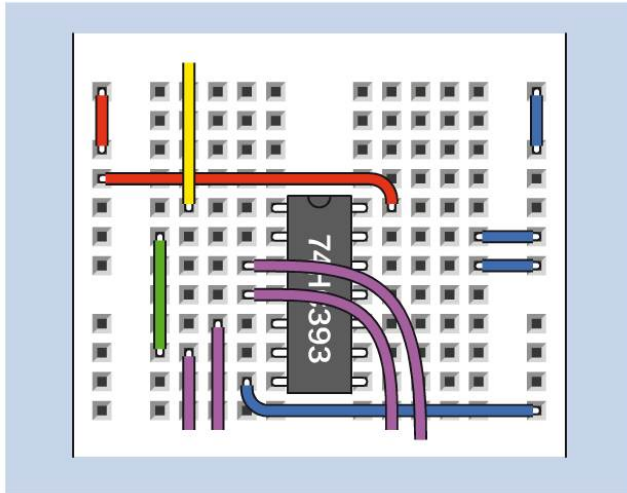


Figure 4-142. Vue rapprochée de la plaque de montage modifiée. La résistance de rappel, l'interrupteur tactile et les liaisons associées ont été retirés. Le fil vert a été ajouté.

Démarrez à nouveau le compteur. Il compte de 0000 à 0111. La valeur binaire suivante devrait être 1000, mais dès que le quatrième chiffre passe de 0 à 1, ce niveau haut remet à 0 le compteur par l'intermédiaire de la broche de réinitialisation.

Pouvez-vous discerner un clignotement de la LED la plus à gauche avant que le compteur ne soit remis à 0 ? J'en doute, car le compteur réagit en moins d'un millionième de seconde.

Le compteur compte à nouveau de 0000 à 0111 avant de recommencer automatiquement. Puisque compter de 0000 à 0111 en binaire est équivalent à compter de 0 à 7 en décimal, nous disposons d'un compteur *diviseur par 8*. Précédemment, nous avions un compteur diviseur par 16.

Si vous déplacez la connexion de réinitialisation du quatrième chiffre vers le troisième, vous aurez un compteur diviseur par 4.

Il est possible de câbler à peu près n'importe quel compteur de façon à ce qu'il se réinitialise automatiquement après avoir compté deux, quatre, ou huit impulsions d'entrée.

Le nombre d'états de sortie d'un compteur avant qu'il ne se répète est connu sous le nom de modulo, souvent abrégé *mod*. Un compteur modulo 8 recommence après le décompte de huit impulsions (numérotées de 0 à 7).

Conversion en modulo 6

Comment devons-nous procéder pour générer les valeurs d'un dé ?

Le dé ayant six faces, nous allons devoir modifier le câblage du compteur afin qu'il se réinitialise après avoir compté six fois.

En code binaire, la séquence de sortie sera la suivante : 000, 001, 010, 011, 100, 101. On peut négliger le bit le plus significatif de la colonne D, car nous ne nous en servons pas pour compter six fois. Nous devons réinitialiser le compteur après la valeur décimale 5, qui est 101 en binaire.

Pourquoi la valeur décimale 5 et non 6 ? C'est parce que nous comptons à partir de 0. Il serait plus pratique que le compteur commence par 1, mais ce n'est pas le cas.

La valeur binaire qui suit 101 est 110. Si vous étudiez la séquence, vous verrez que 110 est la première valeur commençant par 2 bits 1.

Comment dire au compteur, « quand tu as un 1 dans la colonne B ET un 1 dans la colonne C, repasse à 0000 » ? Le mot ET de la phrase vous fournit un indice. Une porte ET (AND) possède une sortie haute si ses deux entrées sont au niveau haut. C'est exactement ce dont nous avons besoin.

Nous pouvons l'installer directement car tous les circuits intégrés de la famille 74HCxx sont prévus pour être reliés ensemble. Sur la figure 4-143, j'ai ajouté une porte ET (AND). Bien entendu, pour ce faire, vous devrez ajouter le composant approprié, qui est un 74HC08. Il contient quatre portes ET, mais nous n'en avons besoin que d'une. En plus de l'ajout des liaisons qui l'alimentent, nous devons relier les entrées inutilisées à la masse. C'est un peu fastidieux, mais je vais vous montrer comment faire, aussitôt que j'aurai réalisé quelques ajouts et modifications. Les sorties inutilisées doivent demeurer non connectées.

Voici le message qu'il convient de retenir. Vous pouvez utiliser des circuits intégrés logiques en association avec un compteur pour modifier son modulo en détectant une combinaison particulière de ses sorties et en la réinjectant à son entrée de réinitialisation.

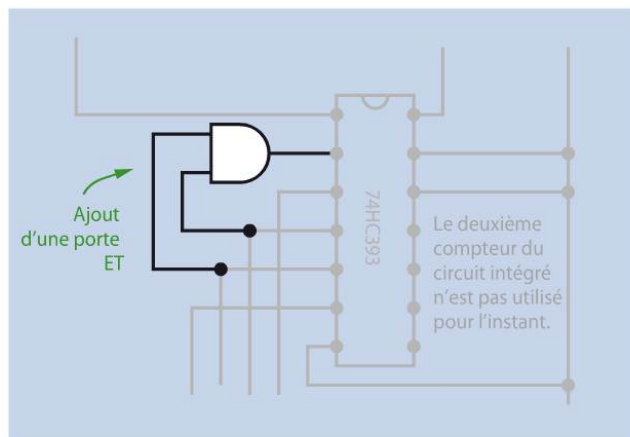


Figure 4-143. Une porte ET est ajoutée, pour forcer le compteur à ne compter que six fois au lieu de seize habituellement.

Ne pas utiliser d'afficheur à sept segments

Pour l'affichage de la valeur du dé, je pourrais utiliser un afficheur à sept segments comptant de 1 à 6. Cependant, cela pose un problème, car le compteur compte de 0 à 5. Cela nécessiterait la difficile conversion de la valeur binaire 000 en valeur numérique 1 pour l'afficheur à sept segments, la valeur binaire 001 en valeur numérique 2 et ainsi de suite.

Comment faire en sorte que le compteur évite la valeur binaire 000 d'une manière ou d'une autre ? Peut-être en utilisant une porte OU à trois entrées qui serait réinjectée à l'horloge pour avancer le compteur d'une position, mais cela entrerait en conflit avec le signal d'horloge, ce qui me semble être une source de problèmes.

Pour ce projet, il faut trouver quelque chose de plus attractif visuellement qu'un afficheur à sept segments. Pourquoi ne pas utiliser des LED représentant les points d'un dé (figure 4-144).

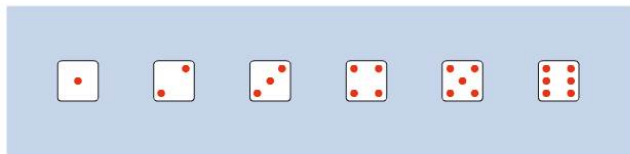


Figure 4-144. Configurations de points à utiliser pour l'affichage par les LED.

Pouvez-vous imaginer un circuit convertissant la sortie binaire du compteur pour allumer les LED selon ces configurations ?

Choix des portes

Commençons par le cas le plus simple. Si je connecte la sortie A du compteur à la LED représentant le point central du dé, cela fonctionne correctement, car le point central n'est allumé que pour les configurations 1, 3 et 5 et éteint pour les configurations 2, 4 et 6. Cela correspond exactement au comportement de la sortie A.

Les choses deviennent un peu plus délicates pour la suite. Je dois allumer un couple de points en diagonale pour les combinaisons 4, 5 et 6, et l'autre diagonale pour les combinaisons 2, 3, 4, 5 et 6.

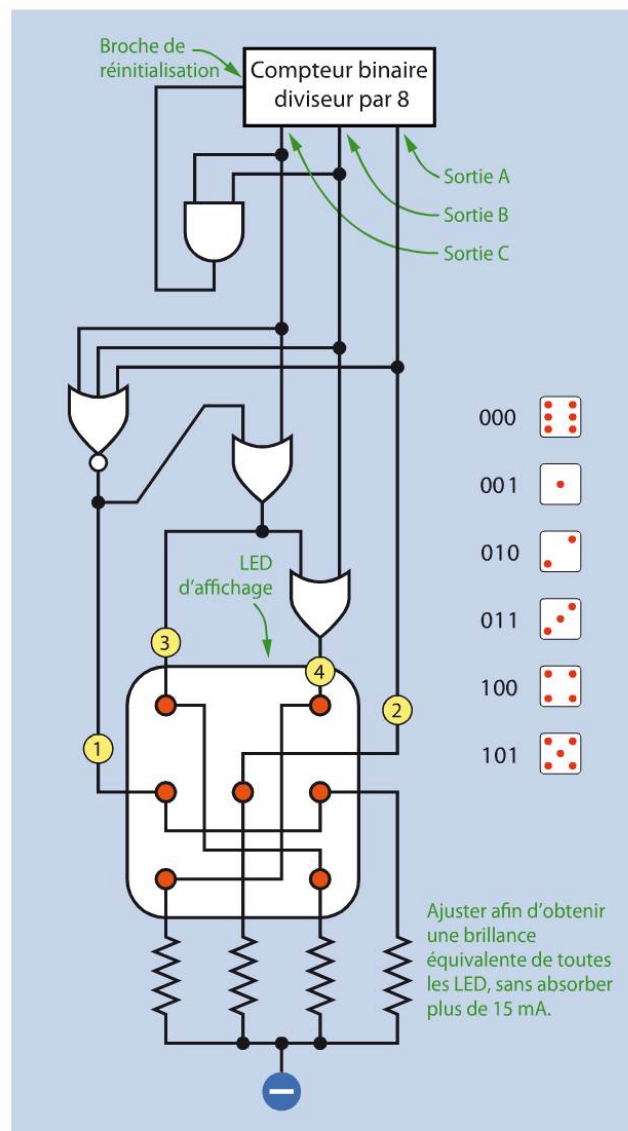


Figure 4-145. Réseau logique affichant la séquence de points d'un dé.

La figure 4-145 apporte une réponse à cette question. J'ai ajouté deux autres portes : une NON-OU à trois entrées et une OU à deux entrées. À côté, j'ai représenté la séquence des valeurs binaires et les configurations de points que chaque valeur doit créer.

Pour que cela fonctionne, j'ai dû commencer par l'affichage de la configuration 6 du dé, quand le compteur est à 000. La valeur de départ de la séquence de l'affichage n'a pas d'importance ; ce qui compte, c'est que toutes les combinaisons soient affichées. De toute façon, elles seront déterminées arbitrairement.

La figure 4-146 montre comment les sorties du compteur affichent les différentes combinaisons de points. Et, si cela reste confus, j'ai créé une séquence de vues montrant les états haut et bas du circuit alors que le compteur s'incrémente de 000 à 101 (figures 4-147, 4-148 et 4-149).

J'ai réduit la taille des vues, afin qu'elles tiennent dans une colonne, et j'ai omis la porte ET car elle ne sert à rien durant le comptage entre 000 et 101. Elle n'agit que lorsque le compteur essaie d'atteindre la valeur 110, pour remettre le compteur à 000.

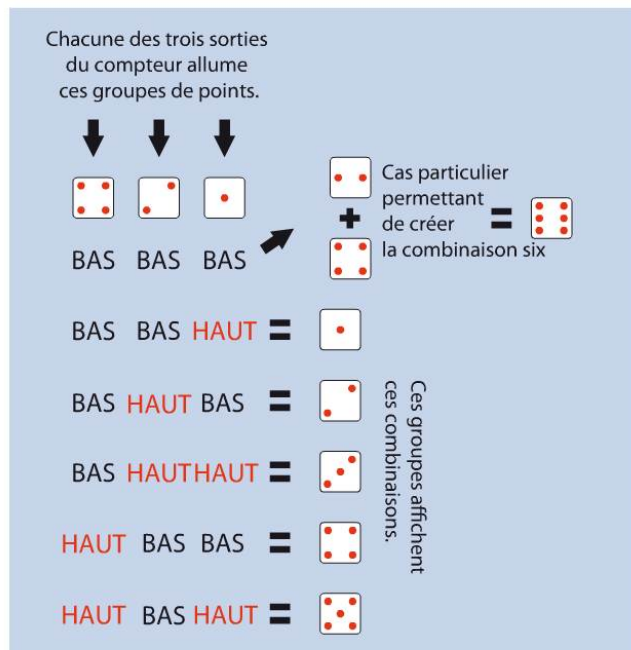


Figure 4-145. Utilisation des sorties du compteur binaire pour afficher les combinaisons de points.

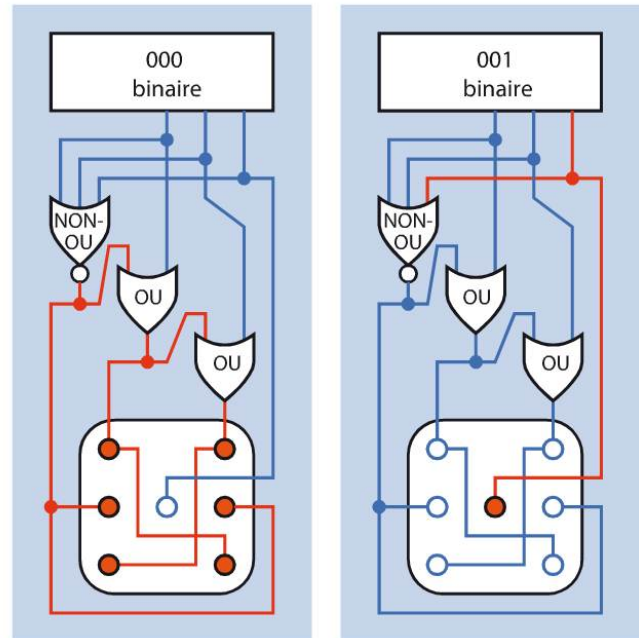


Figure 4-147. Logique de création des combinaisons 6 et 1.

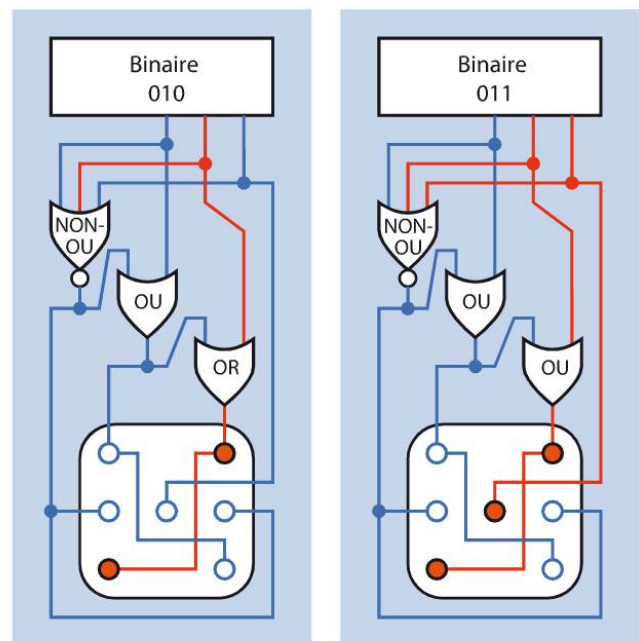


Figure 4-148. Logique de création des combinaisons 2 et 3.

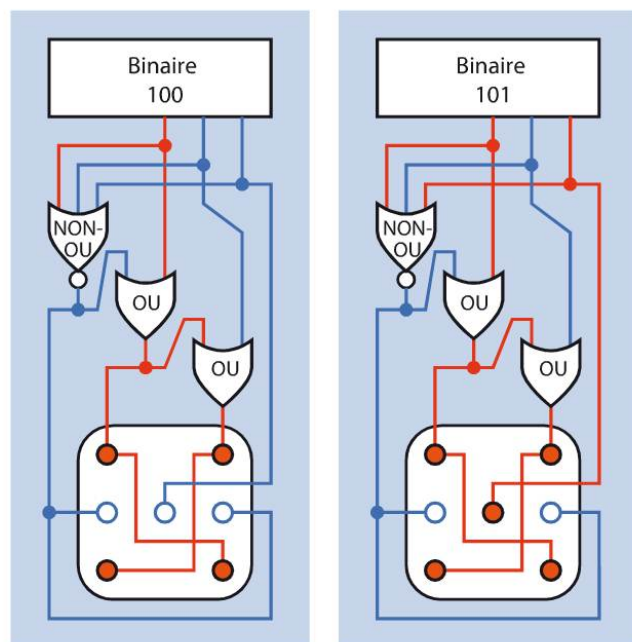


Figure 4-149. Logique de création des combinaisons 4 et 5.

Vous vous demandez peut-être comment je suis arrivé à cette association de portes logiques pour transformer la sortie du compteur en combinaisons d'affichage du dé. Je ne suis pas sûr de pouvoir vous le dire. C'est le résultat d'un certain nombre d'essais plus ou moins fructueux et quelques choix intuitifs pour aboutir à ce diagramme logique. Il existe des façons formelles plus rigoureuses pour y parvenir mais je ne les trouve pas très faciles.

Le circuit terminé

Le schéma de la figure 4-150 est dérivé du diagramme logique de la figure 4-145. La version montée sur une plaque d'essai est représentée sur la figure 4-151.

Les valeurs des composants sont indiquées sur la figure 4-152 page 220. Vous remarquerez que j'ai remplacé la résistance et le condensateur de temporisation du 555 afin que celui-ci fonctionne aux alentours de 5 kHz. Le principe de ce circuit est de pouvoir arrêter le temporisateur à n'importe quel instant, après des centaines de cycles. De cette façon, vous obtiendrez un nombre aléatoire.

J'ai ajouté un condensateur de 22 μF qui est commutable, afin de ralentir le fonctionnement (environ 2 Hz) pour que vous puissiez démontrer le fonctionnement du compteur à quelqu'un de sceptique.

Je n'ai pas pris la peine de montrer les valeurs de la moitié basse du circuit, car les seuls composants présents sont les circuits intégrés. Il est gratifiant de concevoir un montage à l'aide de circuits intégrés logiques : vous n'avez pas à vous soucier de la place occupée par les résistances et les condensateurs. Les circuits intégrés et les liaisons constituent la presque totalité du circuit.

Le nombre de sorties en bas du circuit des figures 4-150 et 4-151 correspond aux connexions des LED d'affichage des combinaisons de points de la figure 4-153 page 220. Il n'y a plus de place sur la platine de montage pour loger les LED ; c'est pourquoi vous devez utiliser une seconde platine de montage ou percer des trous dans une plaque de bois ou de plastique, pour y loger les LED.

Les trois paires de LED sont reliées en série, car un circuit intégré logique ne délivre pas assez de puissance pour piloter deux LED en parallèle. En les reliant en série, une résistance de protection plus faible que d'ordinaire est suffisante. Pour déterminer la valeur de la résistance, appliquez une tension de 5 V CC à l'une des paires de LED et mesurez l'intensité en milliampères, à l'aide de votre multimètre. Commencez avec une résistance de 220 Ω . Si vous ne dépassez pas la valeur maximum de 15 mA, vous êtes en conformité avec les spécifications des circuits intégrés de la série HC. Il vous sera peut-être nécessaire d'utiliser une résistance de 150 Ω ou même de 100 Ω , selon les caractéristiques des LED employées.

Pour terminer, appliquez la tension de 5 V CC à travers une résistance de 330 Ω à la LED centrale, puis comparez sa luminosité avec celle des LED reliées par paires. Il vous sera peut-être nécessaire d'augmenter la valeur de la résistance pour obtenir une luminosité équivalente.

Connectez les LED au circuit logique, appuyez sur le bouton, puis relâchez-le ; vous obtenez la valeur d'un dé.

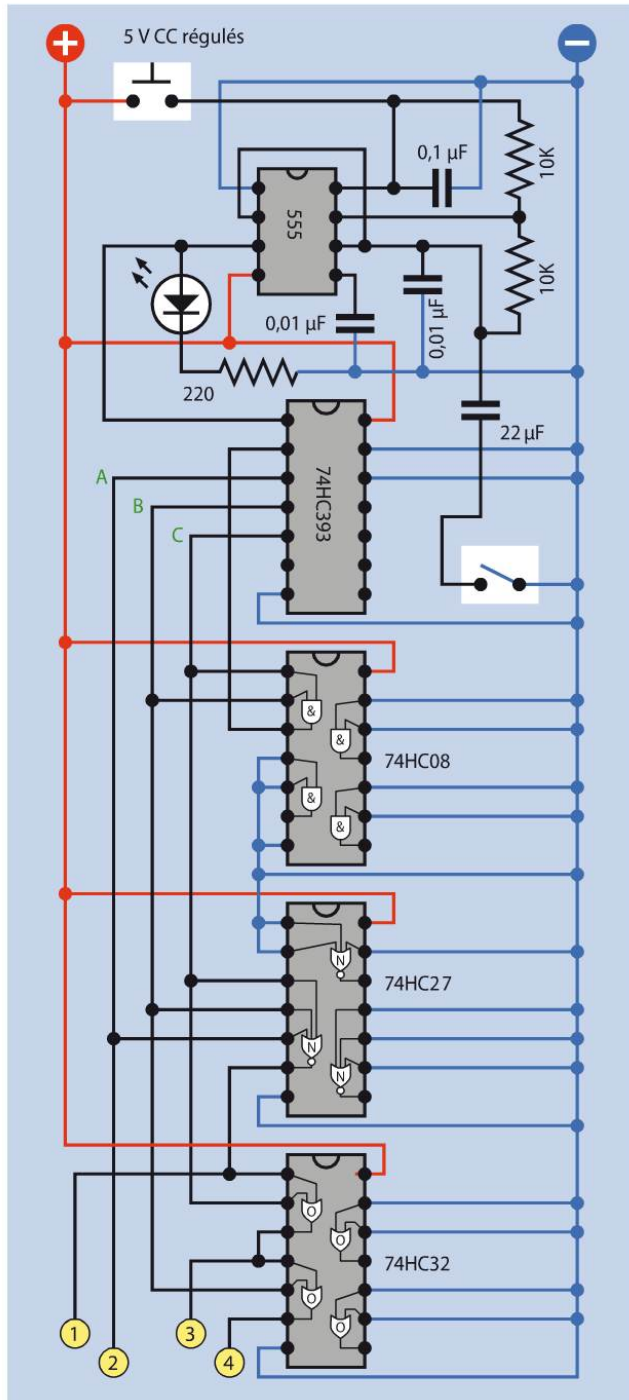


Figure 4-150. Circuit complet simulant un jet de dé.

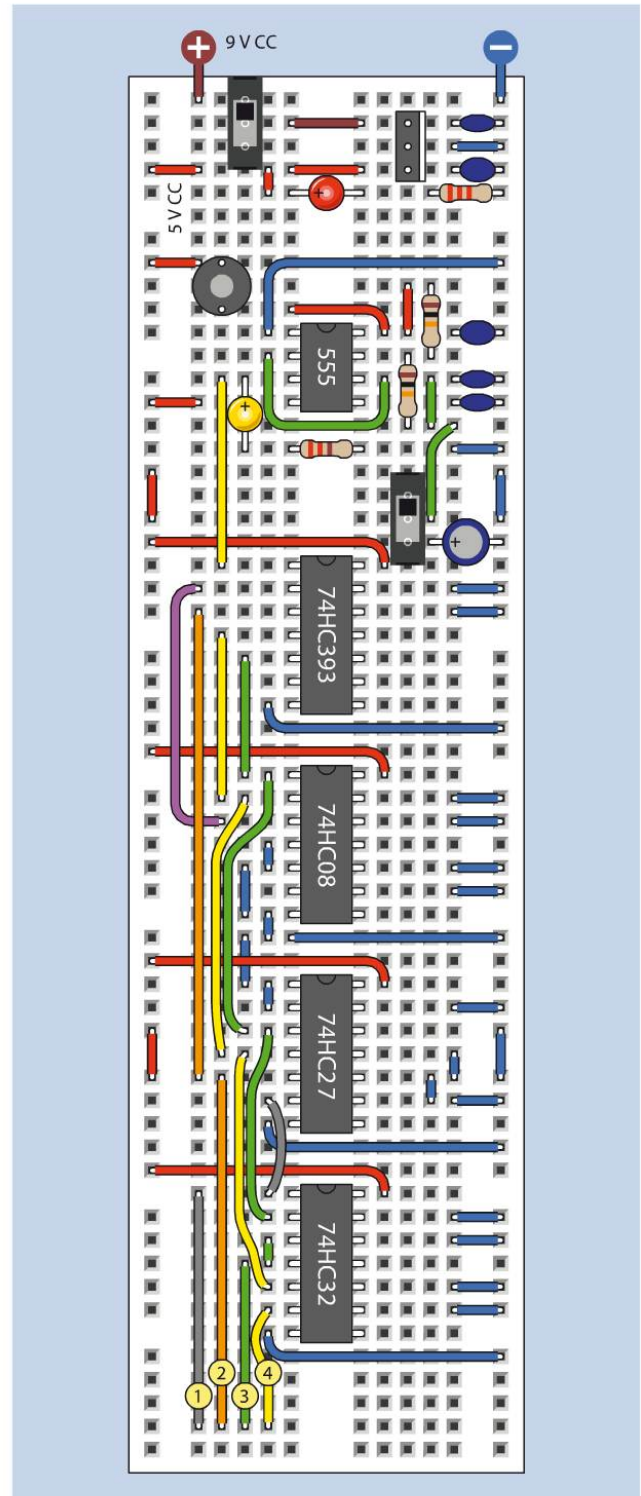


Figure 4-151. Version montée du circuit d'un seul dé.

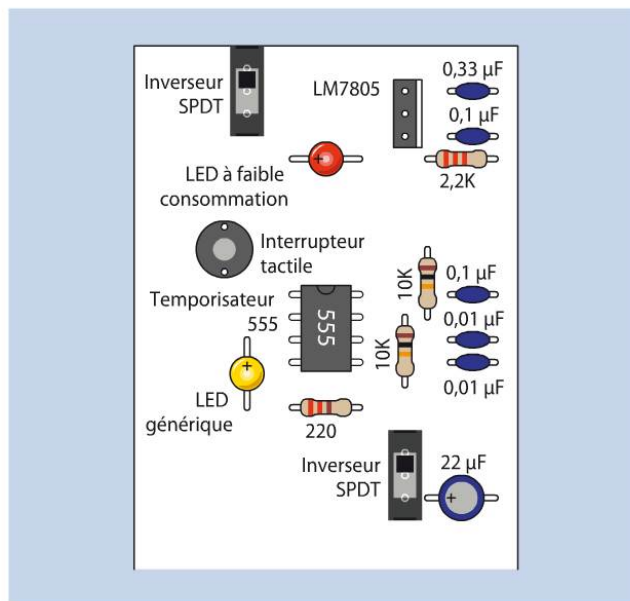


Figure 4-152. Valeurs des composants de la section de contrôle du simulateur de dé.

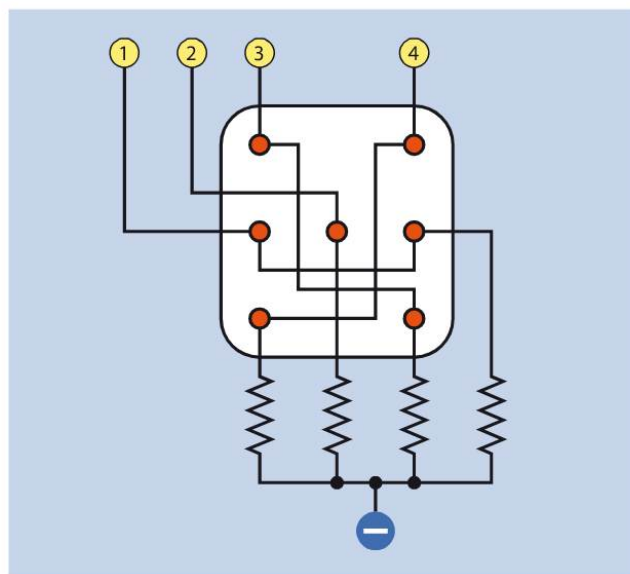


Figure 4-153. Câblage des sept LED (six étant reliées en série par paire), permettant l'affichage des combinaisons de points d'un dé.

Comment être sûr que vous obtenez une valeur réellement aléatoire ? La seule solution consiste à utiliser le circuit de façon répétitive et à noter combien de fois apparaît chaque valeur. Il serait nécessaire de l'utiliser un bon millier de fois pour faire une vérification valable. Le circuit dépendant de l'action d'un utilisateur, il est impossible d'automatiser cette vérification. Tout ce que je peux affirmer, c'est que la valeur obtenue *devrait être* aléatoire.

Bonne nouvelle

Dans ce montage, les circuits intégrés sont plus présents que dans tous les projets précédents de ce livre. C'est une bonne nouvelle, car vous pouvez modifier ce circuit afin qu'il simule deux dés au lieu d'un seul, en ajoutant simplement quelques liaisons et des LED. Inutile d'ajouter d'autres circuits intégrés.

Nous disposons de nombreuses portes inutilisées dans les circuits intégrés présents : trois portes ET sont disponibles, deux NON-OU et deux OU. En plus, il y a un compteur séparé disponible dans le circuit intégré 74HC393. C'est exactement ce dont vous avez besoin.

Comment créer un second nombre aléatoire différent du premier ? Peut-être pourrions-nous ajouter un temporisateur 555 fonctionnant à une vitesse différente ?

Je n'y suis pas favorable, car les deux temporisateurs fonctionneraient de façon décalée et certaines paires de valeurs pourraient apparaître plus fréquemment que d'autres. Il est préférable que le premier compteur compte de 000 à 101, puis provoque l'avancée du second compteur de 000 à 001. Le premier compteur compte à nouveau de 000 à 101 et fait passer le second de 001 à 010. Et ainsi de suite.

Le second compteur fonctionnera six fois moins vite que le premier, mais les combinaisons seront affichées trop rapidement pour être vues. Le gros avantage de cette solution est que toutes les combinaisons possibles apparaîtront le même nombre de fois, elles auront donc toutes à peu près la même chance d'être sélectionnées, exactement comme si l'on utilisait une vraie paire de dés. Je dis « à peu près » parce qu'il faut se souvenir qu'un compteur prend un court délai pour passer de la valeur binaire 101 à la valeur 000. Cependant, si le compteur de gauche fonctionne aux environs de 5 kHz, un délai inférieur à un millionième de seconde n'est pas significatif.

Liaison en chaîne de compteurs

Une dernière question se pose : comment le premier compteur peut-il faire avancer le second quand il atteint la valeur binaire 101 et retourne à 000 ?

C'est facile. Considérez ce qui se passe quand la sortie du premier compteur passe de 011 à 101, puis à 110. Cette dernière valeur n'apparaît qu'un très court instant avant de passer à 000. Dès que la sortie C devient haute, elle repasse au niveau bas.

L'entrée d'horloge du second compteur, comme vous le savez, a besoin d'un front descendant pour s'incrémenter.

Tout ce qui vous reste à faire est donc de relier la sortie C du premier compteur à l'entrée d'horloge du second. Ce circuit intégré est d'ailleurs prévu pour fonctionner de cette façon : le passage au niveau bas d'un compteur sert de « retenue » et permet l'avance du compteur suivant.

Le schéma de la figure 4-154 représente le circuit simulant deux dés. Je n'ai pas prévu le plan de la plaque de montage, car vous devriez être à même d'ajouter les nouvelles liaisons. C'est exactement le symétrique du câblage que vous avez déjà réalisé, sans oublier de le déplacer d'une rangée vers le bas, afin de laisser la place pour l'alimentation de chaque circuit intégré.

Pour aller plus loin

Ce circuit pourrait-il être simplifié ? Comme je l'ai dit précédemment, l'utilisation d'un compteur décimal, au lieu d'un binaire, simplifierait la logique. La porte ET pour compter en modulo 6 ne serait plus nécessaire, car il suffirait de relier la sortie 7 du compteur à son entrée de réinitialisation.

Néanmoins, si vous souhaitez simuler deux dés, deux compteurs décimaux sont nécessaires, donc deux circuits intégrés. Vous aurez toujours besoin de deux circuits intégrés pour réaliser la logique d'affichage des deux combinaisons. Vous saurez pourquoi en recherchant sur Internet : « *digital dice* » ou « *dé électronique* ». Vous devriez comprendre les schémas proposés par Google Images lors de cette recherche.

La seule simplification possible pour ce circuit serait de remplacer chacune des portes OU par deux diodes. Les circuits que l'on trouve en ligne le font fréquemment, mais vous seriez en présence de signaux traversant successivement deux diodes, ce qui abaisserait la tension en dessous d'un niveau acceptable.

Problème du ralentissement

Dans la première édition du livre, le circuit de ce projet comprenait une fonctionnalité appréciable : lorsque le bouton était relâché, les combinaisons du dé apparaissaient de moins en moins rapidement avant de s'arrêter. Cela augmentait le suspense en attente de la valeur finale.

Cette fonction était possible en séparant les tensions d'alimentation du temporisateur 555. Le temporisateur était toujours en action, mais la tension appliquée à son réseau RC était interrompue quand le joueur cessait d'appuyer sur son bouton. À partir de cet instant, un condensateur de valeur élevée se déchargeait dans le réseau RC et le 555 ralentissait au fur et à mesure que la tension baissait.

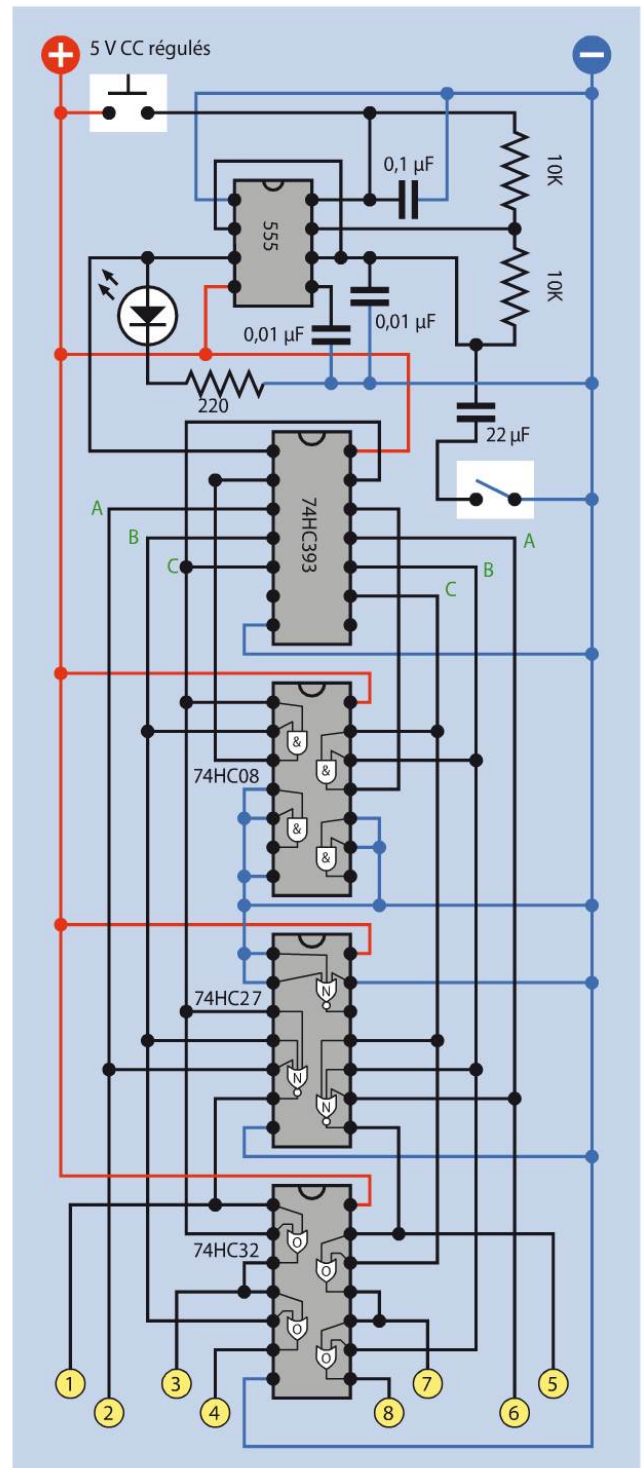


Figure 4-154. Circuit complet simulant deux dés.

Jasmin Patry, un de mes lecteurs, a constaté que la valeur 1 apparaissait plus fréquemment et se demandait si ce phénomène n'était pas dû à la fonction de ralentissement. Comme il est concepteur de jeux vidéo, il est habitué aux phénomènes aléatoires. Il m'a fait parvenir des graphiques montrant la fréquence relative de l'apparition de chaque valeur issue de la simulation et j'ai dû admettre que le problème était bien réel. Je lui ai suggéré quelques explications possibles, mais chacune était erronée. Finalement, Jasmin m'a prouvé que la consommation faible d'une LED (affichant la combinaison 1), comparée à la consommation plus élevée de six LED (affichant la combinaison 6), permettait au temporisateur de fonctionner légèrement plus longtemps quand la tension devenait très faible. Cela augmentait les chances qu'il s'arrête durant cette période.

Jasmin m'a proposé un circuit dans lequel un second temporisateur était ajouté et les deux sorties des temporisateurs étaient mixées par une porte OU exclusif. Il a démontré avec succès que cela éliminait le déséquilibre constaté pour une valeur. J'étais heureux qu'un de mes lecteurs ait pu identifier une erreur et la corriger.

Dans cette nouvelle version, j'ai supprimé le condensateur qui provoquait l'erreur de la première édition. Cependant, je n'ai pas adopté la solution de Jasmin, car elle est relativement compliquée, un seul dé exigeant deux temporisateurs 555 et une porte OU exclusif. Il utilisait également des diodes que j'aurais dû remplacer par des portes OU et la place commençait à manquer sur la plaque de montage.

Solutions alternatives pour le ralentissement

Pour ralentir l'affichage, sans modifier l'apparition aléatoire des valeurs, on pourrait imaginer une solution plus simple. J'ai trouvé quelqu'un qui utilise un transistor NPN dont l'émetteur est relié à la broche 7 du temporisateur, un condensateur reliant sa base à son collecteur, permettant au transistor de fournir une tension décroissante, aussitôt l'alimentation déconnectée. C'est une alternative qui entraîne le même problème que celui identifié par Jasmin.

J'ai également trouvé des circuits qui utilisaient la même configuration de ralentissement que la mienne (par exemple le site Doctronics). Je suppose qu'ils ont la même sensibilité au problème que j'ai décrit.

Ma réponse finale à ce sujet peut paraître insatisfaisante : je ne sais pas comment réaliser un effet ralentisseur sans ajouter des composants qui compliqueraient le circuit.

Une autre alternative non encore testée consisterait à alimenter le temporisateur 555 par un régulateur séparé, afin de l'isoler des variations de tension du reste du circuit.

J'ai réalisé un circuit simulateur de dé utilisant un microcontrôleur PICAXE, mais j'ai découvert qu'il présentait ses propres problèmes de hasard, dû à l'imperfection du générateur de nombres aléatoires interne.

Dans l'expérience 34, vous verrez que j'ai conçu un autre simulateur de dé, utilisant un microcontrôleur Arduino. Toutefois, je dépends à nouveau du générateur interne de nombres aléatoires et je reste sceptique sur sa capacité à générer une série de valeurs réellement aléatoires.



Figure 4-155. Ce module d'affichage des combinaisons de deux dés utilise des LED de 10 mm, intégrées dans un coffret en polycarbonate givré.

Le problème du hasard parfait n'est pas simple du tout. Cela m'a tellement intéressé, qu'après mes échanges avec Jasmin Patry, je l'ai abordé longuement dans *L'électronique en pratique 2*. J'ai également écrit un article à ce sujet dans le magazine *Make*, en collaboration avec Aaron Logue. Il m'a familiarisé avec le concept, en utilisant un générateur de bruit aléatoire comprenant un transistor polarisé en inverse, qu'il traitait ensuite à l'aide d'un algorithme puissant attribué au grand informaticien John Von Neumann. Je pense que c'est le générateur le plus proche de la perfection, mais le nombre de circuits intégrés qu'il nécessite est trop important.

Toutes ces améliorations vont au-delà de l'objectif d'un ouvrage d'initiation. Si l'un de mes lecteurs trouve une amélioration simple du circuit de simulation de dés présenté ici permettant de ralentir son affichage, qu'il me le fasse savoir par l'intermédiaire de l'éditeur.

À ce stade du livre, plusieurs axes de développement sont possibles. En voici quelques-uns.

Électronique audio. Il s'agit d'un domaine bien spécifique, allant du simple amplificateur au dispositif permettant de modifier le son d'une guitare.

Électromagnétisme. C'est un sujet dont je n'ai pas encore parlé, mais qui permet des applications fascinantes.

Appareils à fréquences radio. Cela concerne tout appareil qui reçoit ou transmet des ondes radio, du récepteur à modulation d'amplitude jusqu'aux transmissions complexes.

Microcontrôleurs programmables. Il s'agit de minuscules ordinateurs implantés sur un seul circuit intégré. Vous écrivez un petit programme sur votre ordinateur, qui demandera au circuit de suivre un ensemble d'instructions, par exemple recevoir le signal d'entrée d'un capteur, attendre une certaine durée et envoyer un signal de sortie à un moteur. Puis vous transférez ce programme dans le circuit, qui le stocke dans une mémoire non-volatile. Parmi les microcontrôleurs les plus connus, citons Arduino, PICAXE et BASIC Stamp.

Je n'ai pas la place ici pour présenter de manière détaillée ces différentes branches de l'électronique. Aussi vais-je me contenter, à titre d'introduction, de décrire quelques projets dans chaque domaine. Ce petit aperçu devrait vous aider à mieux cerner vos domaines de prédilection ; il ne vous restera plus qu'à lire des ouvrages spécialisés pour en apprendre davantage.

Dans ce chapitre, je vous donnerai aussi quelques conseils à propos de votre espace de travail, ainsi qu'une petite bibliographie, pour aller plus loin en amateurisme électronique.

Matériel du chapitre 5

Ni outils ni équipement supplémentaires ne sont nécessaires pour ce dernier chapitre du livre. Un récapitulatif de tous les composants utilisés pour les expériences de ce chapitre est présenté sur la figure 6-8.

Personnalisez votre espace de travail

Si vous sentez vous gagner la passion de créer des circuits alors que vous n'avez pas encore installé votre espace de travail, voici quelques conseils. Ayant testé plusieurs configurations, depuis des années, mon premier conseil est celui-ci : ne construisez pas un établi !

De nombreux ouvrages d'électronique vous recommandent d'acheter une planche de contre-plaqué, comme si une table de travail devait être faite sur mesure, afin de satisfaire à des critères précis de dimensions. Selon moi, la forme et la taille importent peu, ce qui est primordial, c'est le rangement.

Les outils et les composants doivent être facilement accessibles, qu'il s'agisse de petits transistors ou d'une grosse bobine de fil. Vous avez besoin de rangements *autour* de votre espace de travail, mais aussi *sous* votre table. Évitez les étagères ouvertes qui sont exposées à la poussière.

La configuration minimale que je recommande se compose d'une paire de meubles de rangement à deux tiroirs ayant un plateau en Formica ou en contre-plaqué.

Parmi tous les plans de travail que j'ai utilisés, celui que j'ai préféré était un ancien bureau métallique – un monstre des années 1950. Les meubles de ce type sont difficiles à déplacer à cause de leur poids et ne sont pas très esthétiques, mais vous pouvez en trouver pour un coût négligeable chez les revendeurs de fournitures de

bureau d'occasion. Ils offrent une surface importante, supportent les contraintes du bricolage et dureront longtemps. Leurs tiroirs sont profonds et s'ouvrent en général facilement, comme ceux des meubles de rangement. Et comme ils sont métalliques, vous pouvez vous en servir pour vous relier à la terre, avant de manipuler des composants sensibles à l'électricité statique. Si vous utilisez un bracelet antistatique, vous pouvez simplement l'attacher avec une vis à tôle à un angle du bureau.

Dans les tiroirs, vous pourrez ranger quelques documents papier utiles :

- fiches techniques ;
- catalogues de pièces détachées ;
- croquis et plans que vous aurez dessinés.

L'espace restant peut être comblé par des boîtes de rangement en plastique pour contenir certains outils que vous utilisez rarement (pistolet à air chaud ou fer à souder de forte puissance) et des gros composants (haut-parleurs, adaptateurs secteur, boîtiers de projets et platines de montage). Préférez des boîtes de forme prismatique, mesurant environ $30 \times 20 \times 12$ cm. Évitez les boîtes qui ont des formes arrondies ou tronquées et n'offrent pas un espace suffisant.

J'apprécie tout particulièrement les boîtes Akro-Grid (figures 5-1 et 5-2), fabriquées par Akro-Mils. Leur catalogue est disponible en téléchargement à l'adresse <http://www.akro-mils.com>. Vous pourrez les trouver chez Farnell (fr.farnell.com), sinon vous trouverez facilement ailleurs des boîtes du même type.



Figure 5-1. Toutes les boîtes Akro-Grid comportent des rainures qui permettent de les compartimenter. Dans un tiroir de rangement classique, il est possible de superposer trois boîtes de ce type.



Figure 5-2. Les couvercles sont vendus séparément et protègent le contenu de la poussière. Cette boîte de grande hauteur peut être placée dans un tiroir de rangement.

Pour les composants de taille moyenne (potentiomètres, connecteurs d'alimentation, boutons de commande et interrupteurs à bascule), je conseille des boîtes de rangement d'environ $30 \times 20 \times 5$ cm divisées en quatre à six compartiments. La marque Plano est très résistante (<http://www.planomolding.com>) ; les produits les mieux adaptés sont répertoriés comme boîtes de rangement pour matériel de pêche.

Quant aux boîtes plates, sans compartiments, le type présenté sur la figure 5-3 (réf. Pro-Latch 23600-00 de Plano) convient parfaitement. Vous en trouverez dans les grandes surfaces de bricolage.



Figure 5-3. Cette boîte Plano sans compartiments permet de ranger des bobines de fil ou des outils de taille moyenne. Il est possible de les ranger verticalement, dans un même tiroir.

Plano vend aussi des boîtes à outils bien conçues, dotées de petits tiroirs qui facilitent l'accès aux tournevis, pinces et autre matériel.

Si vous disposez d'un bureau en acier aux tiroirs assez profonds, l'un d'eux peut être réservé aux catalogues. Ne sous-estimez pas leur importance au motif que vous pouvez tout acheter sur Internet. Le catalogue de Mouser, par exemple, possède un index qui s'avère finalement plus pratique que leur outil de recherche en ligne ; à plusieurs reprises, j'ai trouvé dans ce catalogue des articles dont je ne soupçonnais même pas l'existence, simplement en tournant les pages. Certains distributeurs comme Mouser ou Gotronic vous envoient gratuitement leur catalogue papier, alors que d'autres ne proposent qu'une version numérique.

Nous arrivons maintenant à la grande question : comment stocker tous les composants tels que résistances, condensateurs et circuits ? J'ai testé diverses solutions. La plus évidente consiste à acheter un casier de petits tiroirs amovibles, que vous placez sur votre bureau pour y accéder aisément. Cependant, je n'aime pas ce système, pour deux raisons. D'abord, vous devrez subdiviser les tiroirs pour y ranger les composants les plus petits, mais les cloisons ne seront jamais totalement fiables. Ensuite, si vous utilisez des tiroirs amovibles vous risquez de les renverser accidentellement. Peut-être serez-vous assez précautionneux pour éviter ce genre d'incident, mais pas moi !

Pour ces raisons, je préfère utiliser des boîtes Darice Mini-Storage (figure 5-4). Vous pourrez vous en procurer sur le site <http://www.craftamerica.com> ou en cherchant « Darice mini » sur Internet.



Figure 5-4. Les boîtes Darice Mini-Storage sont idéales pour les composants comme les résistances, les condensateurs et les semi-conducteurs. Elles peuvent être empilées de façon stable, rangées sur des étagères ou regroupées. L'autocollant de la marque peut être facilement retiré après avoir été chauffé avec un pistolet thermique.

Les boîtes bleues sont divisées en cinq compartiments dont la taille et la forme conviennent aux résistances. Les boîtes jaunes à dix compartiments sont idéales pour les semi-conducteurs. Les boîtes violettes n'ont pas de subdivisions et les boîtes rouges en ont de différentes tailles.

Comme les cloisons sont moulées à l'intérieur des boîtes, elles ne risquent pas de sortir de leur emplacement, ni les composants de se mélanger. Les couvercles tiennent parfaitement et possèdent des charnières métalliques : même si vous faites tomber une boîte, il y a peu de chance qu'elle s'ouvre. Autre avantage de ces boîtes, elles peuvent être empilées sans risque.

Après avoir longtemps cherché, j'ai trouvé des boîtes en plastique d'environ 33 × 20 × 12 cm de profondeur, qui permettent de loger 9 petites boîtes de rangement Darice. Elles peuvent être rangées par catégorie sur des étagères.

Étiquetage

Quelle que soit la façon dont vous rangez vos composants, il est essentiel de procéder à un étiquetage. Vous pouvez imprimer des étiquettes repositionnables et ainsi revoir votre classement si besoin, cela arrive souvent. Pour les résistances, j'utilise des étiquettes comportant un code couleur : ainsi, en comparant les bandes d'une résistance et le code sur l'étiquette, je sais instantanément si la résistance a été rangée dans le mauvais compartiment (figure 5-5).



Figure 5-5. Pour vérifier que les résistances sont rangées dans les bons compartiments, imprimez leur code couleur sur l'étiquette correspondante.

Plus important encore : je vous conseille d'ajouter une seconde étiquette (non adhésive) au fond de chaque compartiment, avec les composants. Elle doit indiquer

la référence et sa provenance, afin de faciliter le réapprovisionnement. Par exemple, vous pouvez découper l'étiquette figurant sur l'emballage des composants et la glisser dans le compartiment ad hoc.

Si j'étais vraiment bien organisé, je créerais une base de données sur mon ordinateur pour répertorier tout ce que j'achète, en mentionnant la date d'achat, la source, le type de composant et la quantité. Mais je ne le suis pas !

Sur l'établi

Certains éléments sont si essentiels qu'ils devraient être en permanence sur votre bureau ou votre plan de travail. Il s'agit notamment du ou des fer(s) à souder, de la troisième main avec loupe, de la lampe de bureau, de la platine de montage, du bloc multiprise et du bloc d'alimentation. Pour la lampe de bureau, je conseille un modèle à lampe LED, pour les raisons qui sont détaillées dans l'expérience 14.

La question du bloc d'alimentation est un choix personnel. Si vous êtes passionné d'électronique, vous pouvez acheter une alimentation de laboratoire délivrant un courant continu lissé à diverses tensions réglées et calibrées. L'adaptateur secteur à prise murale que vous avez utilisé jusqu'à présent ne répond à aucun de ces critères et sa tension de sortie varie en fonction de la charge appliquée. Pourtant, comme vous l'avez vu, il convient très bien pour les expériences élémentaires et, lorsque vous utilisez des circuits logiques, vous devez de toute manière monter un régulateur 5 V sur la platine de montage. C'est pourquoi je considère qu'il est facultatif d'acheter une alimentation de laboratoire.

Un autre appareil en option est l'oscilloscope. Il vous montrera, sous forme graphique, les variations électriques parcourant les liaisons et les composants et, en appliquant ses sondes en différents points, vous pourrez déceler les éventuelles erreurs de votre circuit. C'est un beau gadget, mais il vous en coûtera plusieurs centaines d'euros ; or, jusqu'à présent, il ne nous a pas été nécessaire. En revanche, si vous prévoyez de vous lancer sérieusement dans les circuits audio, un oscilloscope s'avérera bien plus important, car vous pourrez visualiser la forme des signaux que vous générerez.

Au lieu d'un oscilloscope, vous pouvez acheter un appareil moins coûteux, qui se branche sur le port USB de votre ordinateur et utilise l'écran pour afficher le signal. J'en ai testé un, sans être satisfait du résultat. Il fonctionnait, mais ne m'a pas paru suffisamment précis ni

fiable, pour l'étude des signaux à basse fréquence. Peut-être était-ce de la malchance, mais j'ai préféré ne pas en essayer d'autre.

Inévitablement, la surface de votre bureau sera endommagée par des éraflures, des marques de coupures ou des gouttes de soudure. Une plaque de contreplaqué, maintenue à l'aide d'un étau miniature convient très bien. Précédemment, afin de réduire le risque d'électricité statique lorsque je travaille avec des composants sensibles, j'avais recouvert le contreplaqué de mousse conductrice. Au fil du temps, j'ai constaté que mes chaussures, ma chaise et la moquette au sol de mon local ne produisaient finalement pas d'effet électrostatique destructeur. Par expérience, vous pourrez déterminer s'il en va différemment dans votre cas. Si vous apercevez de petites étincelles quand vous touchez un objet métallique et si vous ressentez une petite décharge électrique, il est nécessaire de vous relier à la terre et, le cas échéant, d'utiliser de la mousse antistatique ou une pièce métallique sur votre plan de travail.

Votre établi va nécessairement connaître la pagaille. Bouts de fils, vis éparses, attaches et morceaux d'isolants auront tendance à s'accumuler et, si des fragments de métal se glissent dans un projet que vous développez, ils pourront provoquer des courts-circuits. Par conséquent, il vous faudra un conteneur à déchets, facile d'emploi. Pour ma part, j'utilise un grand seau, pour être certain de ne pas manquer ma cible !

Enfin, vous aurez absolument besoin d'un ordinateur. Toute la documentation technique est disponible sur Internet, les composants peuvent y être commandés et les passionnés d'électronique y proposent des exemples de circuits, je ne pense pas qu'il soit possible de travailler efficacement sans disposer d'un accès rapide à Internet. Pour économiser l'espace, je vous conseille de choisir un ordinateur portable, bon marché et peu encombrant.

Vous trouverez sur la figure 5-6 la configuration d'un poste de travail utilisant un bureau métallique. Un exemple d'optimisation de l'espace est proposé sur la figure 5-7.

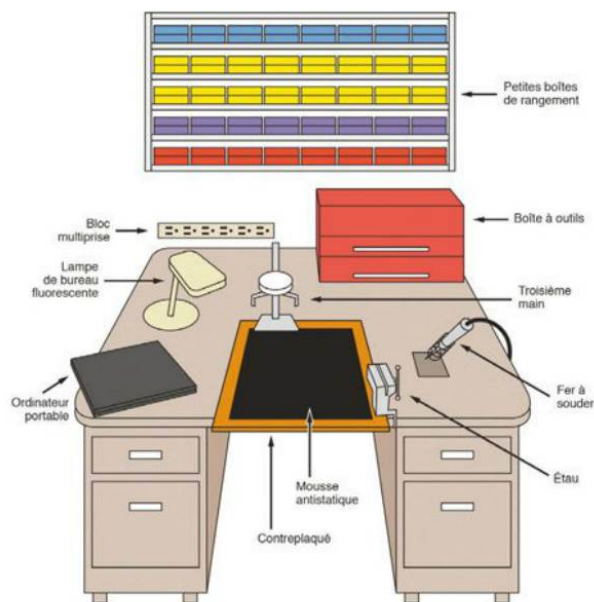


Figure 5-6. Pour les petits projets d'électronique, un vieux bureau en acier fera aussi bien l'affaire, si ce n'est mieux, qu'un établi traditionnel. Il offre une surface de travail conséquente et de nombreuses possibilités de rangement. De plus, sa masse métallique est suffisamment importante pour vous relier à la terre lorsque vous manipulez des composants sensibles à l'électricité statique.



Figure 5-7. Pour profiter au maximum de l'espace environnant, vous pouvez vous entourer de cloisons.

Sources de référence en électronique

Voici quelques sites et ouvrages de référence consacrés à l'électronique, en français ou en anglais.

Sur Internet

- <http://www.tavernier-c.com>

Le site de Christian Tavernier, auteur de plusieurs ouvrages de référence, offre toute une gamme de services liés à l'électronique et à la microinformatique : documentations, brochages, normes, schémas, réalisations de montages divers, présentation de circuits intégrés, logiciels pour l'électronique, livres, etc.

- <http://www.elektor.fr>

Le site de la revue *Elektor* regroupe notamment des articles, un forum, ainsi que des composants et des kits à la vente.

- <http://abcelectronique.com>

Le portail ABCelectronique est un site prisé par les professionnels et les amateurs, qu'ils soient débutants ou confirmés, dans le domaine de l'électronique et des circuits intégrés.

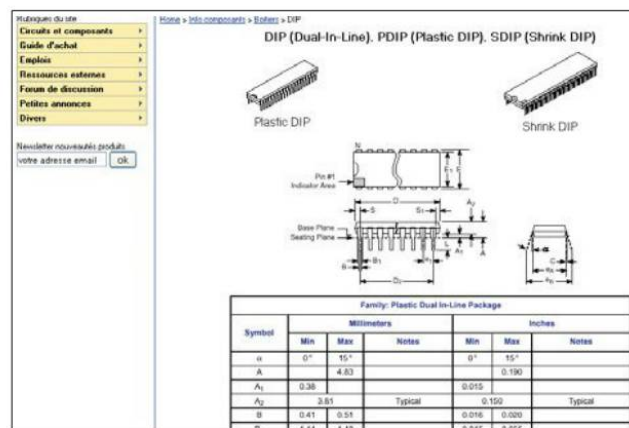


Figure 5-8. Extrait de page du site ABCelectronique.

Parmi les sites en anglais, on peut mentionner :

- <http://www.doctrionics.co.uk>

Doctrionics est l'un de mes sites favoris ; basé en Angleterre, il est à vocation pédagogique. J'apprécie ses schémas et les nombreuses illustrations de circuits sur plaques de montage. Des kits sont proposés à la vente si vous acceptez de payer et d'attendre l'envoi effectué depuis le Royaume-Uni.

- <http://www.tinaja.com>

Pour découvrir des projets originaux, visitez le site de Don Lancaster, *The Guru's Lair*. Il y a plus de 30 ans, Lancaster a écrit l'ouvrage *The TTL Cookbook*, qui a ouvert la voie de l'électronique à au moins deux générations d'amateurs passionnés. Il connaît bien ce dont il parle et n'a pas peur d'aborder des sujets très ambitieux, comme la réalisation de son propre pilote d'imprimante PostScript ou encore la création de ses connexions de port série. Vous trouverez beaucoup d'idées sur ce site.

Bibliographie

Oui, certains livres d'électronique vous seront utiles (figure 5-8). Puisque vous êtes en train de lire le mien, je ne vous recommanderai pas d'autres ouvrages d'initiation. Je vais plutôt vous conseiller des titres qui vous permettront d'approfondir certains sujets.

- *L'électronique en pratique 2* (Eyrolles, 2015) est un livre que j'ai écrit pour aborder des sujets que je n'avais pu développer dans le présent ouvrage, tels que les amplificateurs opérationnels. Certains des circuits présentés sont plus sophistiqués. Si vous lisez aussi ce livre, vous aurez couvert la plupart des aspects de l'électronique accessibles pour un amateur.
- *Practical electronics for inventors*, de Paul Scherz et Simon Monk (McGraw-Hill, 2013) est un ouvrage (en anglais) complet très utile. Il est ma principale référence et couvre un large éventail de concepts, depuis les propriétés élémentaires des résistances et des condensateurs jusqu'aux notions de mathématiques les plus pointues.
- *CMOS Sourcebook*, de Newton C. Braga (Sams Technical Publishing, 2001). Il s'agit d'un ouvrage (en anglais) entièrement consacré à la série 4000 des circuits CMOS, et non à la série 74HC00 que j'ai principalement utilisée dans ce livre. La série 4000 est plus ancienne et doit être utilisée avec davantage de précautions, car elle est plus vulnérable à l'électricité statique que les générations ultérieures. Cependant, les circuits demeurent largement disponibles et tolèrent un large éventail de tension d'alimentation, de 5 à 15 V. Cela signifie que vous pouvez par exemple monter un circuit 12 V qui commande un temporisateur 555 et utiliser sa sortie directement en entrée des circuits CMOS. Le livre est découpé en trois parties : notions fondamentales sur les CMOS, diagrammes fonctionnels (avec indication de leurs brochages) et circuits simples.

- *Arduino – Maîtriser sa programmation et ses cartes d'interface (shields)*, de Christian Tavernier (Dunod, 2011). Si vous appréciez la simplicité et les performances du microcontrôleur Arduino que je décris plus loin, cet ouvrage est une excellente introduction et il vous familiarisera avec le langage de programmation associé.
- *Le grand livre d'Arduino*, d'Erik Bartmann (Eyrolles, 2015). Remarquable par son approche pédagogique, cet ouvrage va plus loin que le précédent, en délivrant un peu de théorie et surtout beaucoup de pratique avec ses 22 montages à réaliser.
- *Fondements d'électronique*, 6^e éd. et *Systèmes numériques*, 9^e éd., de Thomas L. Floyd, (Reynald Goulet, 2013). Ces deux bibles de l'électronique, régulièrement rééditées, constituent des ouvrages de référence pour les étudiants comme pour les amateurs, en dépit de leur aspect académique.

Expérience 25 : autour du magnétisme

Après avoir passé en revue vos choix futurs, étudions un sujet important que nous n'avons pas encore abordé : la relation entre l'électricité et le magnétisme. Cela va nous amener rapidement à la reproduction audio et la radio-diffusion. Je vais détailler les principes fondamentaux de l'inductance, qui est la troisième et dernière propriété des composants passifs, après la résistance et la capacité. Il s'agit d'une notion rarement appliquée dans les circuits fonctionnant en tension continue. Mais dès que nous commencerons à étudier les signaux analogiques fluctuants, cela deviendra fondamental.

Fondamentaux : une relation bilatérale

L'électricité peut créer un champ magnétique : *quand l'électricité traverse un conducteur, elle crée un champ magnétique autour de ce conducteur.*

Tout moteur électrique exploite cette relation entre électricité et magnétisme.

Mais le magnétisme peut aussi créer de l'électricité : *quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique, ce dernier crée un courant électrique dans le fil.*

Ce principe est utilisé dans les générateurs électriques. Un moteur diesel, une turbine, une éolienne, ou toute autre source d'énergie fait tourner un bobinage de fil

conducteur dans un champ magnétique puissant. De l'électricité est induite dans la bobine. À l'exception des panneaux solaires, toutes les sources d'énergie électrique utilisent des aimants et des enroulements filaires.

Dans l'expérience suivante, vous verrez une démonstration de cet effet. Elle devrait faire partie de tous les enseignements en science et même si vous l'avez déjà testée, je vous suggère de la refaire, car elle est très rapide et assez spectaculaire.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 grand tournevis
- Environ 2 m de fil de jauge AWG 22 (0,64 mm) ou plus fin
- 1 pile de 9 V
- 1 trombone

Marche à suivre

Il est difficile de faire plus simple. Enroulez le fil autour du tournevis, proche de sa lame. Le bobinage devra être net et serré, prévoyez un espacement constant entre les spires, vous aurez 100 tours à réaliser sur une longueur n'excédant pas 5 cm. Pour que tous les enroulements tiennent sur cet espace, vous devrez les superposer. Si le dernier tour se défait, fixez-le avec un morceau de ruban adhésif.

Reliez ensuite la pile. À première vue, cela semble une mauvaise idée, car la pile va être court-circuitée et se décharger, comme dans l'expérience 2. Pourtant, en faisant circuler l'électricité à travers un fil bobiné non tendu, le courant est inhibé et produit un certain effet, comme le déplacement d'un trombone.

Approchez alors un trombone de la pointe du tournevis (figure 5-9).

La surface doit être lisse, pour que le trombone glisse facilement. Beaucoup de tournevis étant déjà magnétisés, il se peut que le trombone soit naturellement attiré vers la pointe. Si tel est le cas, placez-le en dehors du champ d'attraction, puis appliquez les 9 V à la bobine ; le trombone doit alors se coller à la pointe du tournevis.



Figure 5-9. Lorsqu'il est relié à la pile, cet électroaimant simple est capable de déplacer un trombone.

Félicitations ! Vous venez de créer un électroaimant. Le schéma correspondant à ce circuit est représenté sur la figure 5-10.

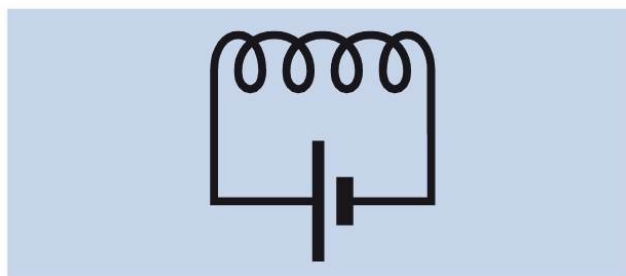


Figure 5-10. Il n'y a guère de schéma plus simple que celui de l'électroaimant.

Théorie : l'inductance

Quand l'électricité passe à travers un fil, elle crée un champ magnétique autour. Comme l'électricité induit cet effet, on parle d'*inductance* (figure 5-11).

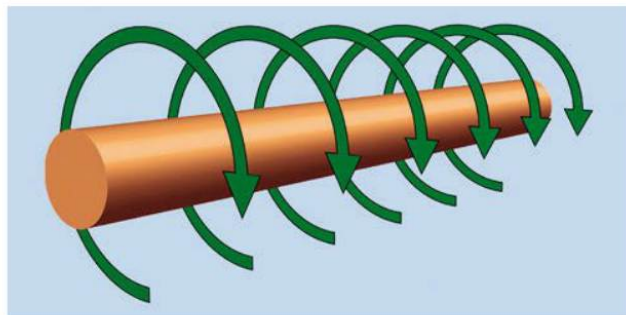


Figure 5-11. Lorsque le flux d'électricité se déplace de gauche à droite le long de ce conducteur, il induit une force magnétique symbolisée par les flèches vertes.

Le champ autour d'un fil droit est très faible, mais si nous donnons au fil la forme d'un cercle, la force magnétique commence à s'accumuler, pointant vers le centre de ce cercle (figure 5-12). Si nous ajoutons d'autres cercles, pour former une bobine, la force augmente encore. Et si nous plaçons un objet magnétique (un tournevis) au centre de la bobine, elle s'accroît encore davantage.

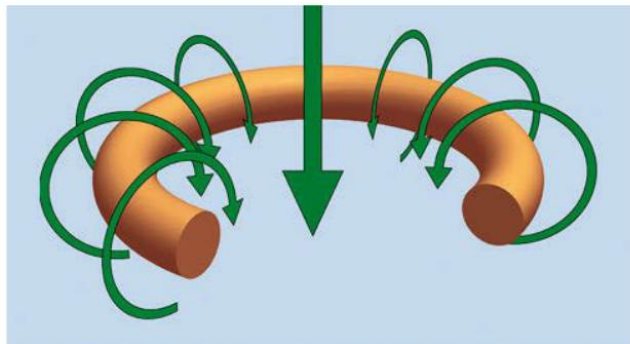


Figure 5-12. Si le fil conducteur est courbé pour former un cercle, la force magnétique accumulée agit à travers le centre du cercle, comme illustré par la grande flèche verte.

La figure 5-13 montre graphiquement ce phénomène, ainsi que les formules mathématiques connues sous le nom de « formule de Wheelers », qui calculent approximativement l'inductance d'une bobine, en supposant que vous connaissiez son rayon intérieur, son rayon extérieur, sa longueur et le nombre de spires. L'unité de base de l'inductance est le *henry*, choisi en souvenir d'un pionnier américain de l'électricité, Joseph Henry. C'est une unité de forte valeur (comme le farad) ; la formule exprime la valeur de l'inductance en microhenrys (μH).

Vous constatez sur le graphique que si vous conservez les dimensions d'une bobine et doublez le nombre de spires (en utilisant un fil plus fin ou du fil ayant un isolant plus fin), la valeur de l'inductance augmente d'un facteur de quatre. Cela est dû à l'élévation au carré du nombre de tours ($N \times N$) dans la formule.

Voici quelques notions à retenir :

- L'inductance augmente avec le diamètre de la bobine.
- L'inductance augmente selon le carré du nombre de spires.
- Si le nombre de spires reste identique, l'inductance sera plus faible si la bobine est mince et longue, et sera plus importante si elle est regroupée et courte.

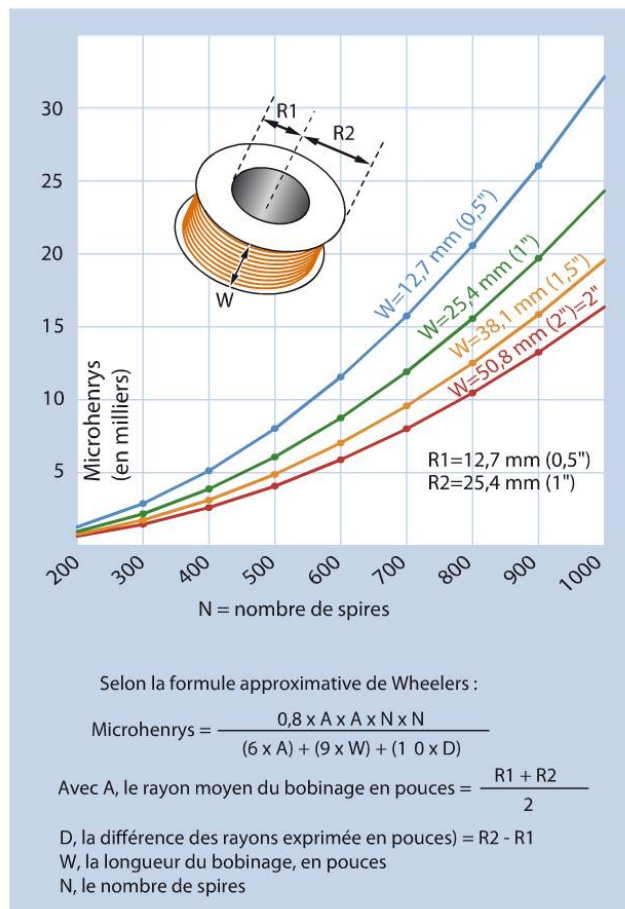


Figure 5-13. Représentation graphique montrant l'influence des dimensions et du nombre de tours sur la valeur de l'inductance d'une bobine, calculée approximativement à l'aide d'une formule simple.

Fondamentaux : symboles et bobines

Examinez les symboles des bobines de la figure 5-14. Les deux symboles de gauche représentent une bobine avec un noyau à air, le premier symbole étant plus ancien que le second. Les deux symboles de droite schématisent une bobine réalisée autour d'un noyau, respectivement de fer (troisième symbole) ou de particules de fer ou d'une ferrite (quatrième symbole).

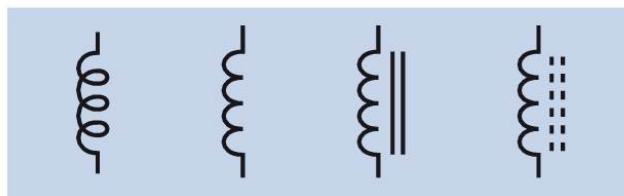


Figure 5-14. Symboles schématiques des bobines.

Un noyau de fer augmente l'inductance d'une bobine, car il concentre l'effet magnétique.

Si vous mesurez le champ magnétique créé par une bobine alimentée par une source positive d'un côté et négative de l'autre, le champ s'inversera si vous inversez la polarité de l'alimentation.

Les transformateurs, où le courant alternatif appliqué à une bobine induit un courant alternatif dans l'autre, sont sans doute l'application la plus répandue des bobines. Si l'enroulement primaire (l'entrée), possède la moitié des spires de l'enroulement secondaire (la sortie), la tension délivrée sera doublée et l'intensité divisée par deux – en supposant que le transformateur soit efficace à 100 %.

Historique : Joseph Henry

Né en 1797, Joseph Henry a été le premier à étudier et à démontrer la puissance des électroaimants. Il est aussi à l'origine du concept d'inductance, selon lequel l'inertie électrique est une propriété d'une bobine de fil.

Henry s'inscrit en 1819 à l'Académie d'Albany, où se révèlent ses aptitudes pour la science. En 1826, il y est nommé professeur de mathématiques et de philosophie naturelle, sans être pour autant diplômé. Il se décrivait d'ailleurs lui-même comme un autodidacte.



Figure 5-15. Joseph Henry est un scientifique américain, pionnier des recherches en électromagnétisme (source : Wikimedia Commons).

Henry obtient un poste à Princeton, en 1832. Quand Morse tente de breveter le télégraphe, Henry certifie qu'il en connaissait déjà le concept. En effet, il avait conçu un dispositif similaire pour prévenir son épouse à son domicile, quand il travaillait dans son laboratoire du Philosophical Hall.

Outre la physique, Henry enseigna aussi la chimie, l'astronomie et l'architecture. La science n'étant pas alors compartimentée en spécialités comme aujourd'hui, il s'intéressa à des phénomènes aussi divers que la phosphorescence, le son, la capillarité et la balistique. En 1846, il devint le secrétaire du Smithsonian Institute, récemment fondé.

Expérience 26 : un générateur de tension

Dans l'expérience 5, vous avez vu que des réactions chimiques pouvaient créer de l'électricité. Nous allons maintenant générer de l'électricité à l'aide d'un aimant.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 pince coupante, une pince à dénuder, des fils de test, un multimètre
- 1 aimant cylindrique au néodyme de 5 mm de diamètre et 35 mm de long, magnétisé selon son axe
- Environ 60 m de fil de câblage de jauge AWG 22, 24 ou 26
- 1 LED à faible consommation
- 1 condensateur de 1 000 μF
- 1 diode 1N4001 ou similaire

En option :

- 1 aimant cylindrique au néodyme de 20 mm de diamètre et de 25 mm de long, magnétisé axialement
- 1 cylindre de bois de 13 mm de diamètre et 150 mm de long
- 1 vis à tête plate, de diamètre 3 mm
- 1 morceau de tube en PVC de diamètre intérieur 20 mm et de longueur minimale 150 mm
- 2 morceaux de contre-plaqué de 6 mm d'épaisseur, d'environ 100 × 100 mm et une scie à cloche de 13 mm ou un foret pour percer un trou dans le contre-plaqué
- 1 bobine de fil émaillé de diamètre 0,4 mm, d'environ 120 m

Marche à suivre

Pour commencer, il vous faut un aimant au néodyme, puissant et relativement peu coûteux si vous choisissez un petit aimant cylindrique. Un aimant de 5 mm de diamètre et de 30 mm de long suffira. Enroulez une dizaine de tours de fil de jauge AWG 22 autour, en serrant les spires (figure 5-16). Laissez ensuite le fil se détendre, afin que l'aimant puisse coulisser à l'intérieur de l'enroulement.



Figure 5-16. Dix spires de fil suffisent à créer un potentiel électrique quand un aimant se déplace à l'intérieur.

Réglez votre multimètre pour la mesure des millivolts AC (pas DC, car nous allons détecter des impulsions électriques alternatives). Dénudez légèrement les extrémités de la bobine et utilisez des fils munis de pinces crocodile pour relier votre multimètre. Prenez l'aimant entre le pouce et l'index, puis déplacez-le de part et d'autre à l'intérieur de la bobine. Vous devriez mesurer une tension de 3 mV à 5 mV. C'est faible ; ce petit aimant associé à une bobine de dix spires ne peut générer que quelques millivolts.

Essayez de bobiner davantage de fil en superposant les couches (figure 5-17). À nouveau, déplacez rapidement l'aimant. Vous devriez constater que vous générez une tension plus importante.



Figure 5-17. En déplaçant l'aimant, la tension mesurée sera plus importante si l'on ajoute des spires.

Rappelez-vous la formule de l'expérience précédente : lorsqu'on fait passer un courant électrique dans les spires d'une bobine, plus elles sont nombreuses, plus le champ magnétique généré est important. Cela fonctionne dans les deux sens.

En général, plus on augmente le nombre de spires, plus la tension est élevée, lorsqu'un aimant se déplace à l'intérieur.

En utilisant un aimant plus gros et plus puissant, ainsi qu'une bobine possédant de nombreuses spires, pourrions-nous générer assez d'électricité pour allumer une LED ?

Allumer une LED

Je vais utiliser du fil de jauge AWG 22, car vous en avez déjà utilisé pour les autres expériences. Le problème est qu'il est relativement gros et possède un isolant épais. Une bobine de 200 spires de ce fil commence à devenir conséquente. C'est pourquoi nous devrions utiliser du fil émaillé qui est en cuivre pur, isolé par une très fine couche de vernis ou un film plastifié. Le fil émaillé est prévu pour être enroulé de façon très dense.

Cependant, si vous ne souhaitez pas dépenser le coût d'une bobine de fil émaillé uniquement pour cette expérience, vous pouvez le remplacer par du fil de câblage classique.

Vous aurez besoin de 60 m de fil, que vous pourrez toujours réutiliser pour un usage conventionnel, comme la réalisation de fils de pontage. Si vous les torsadez fermement, vous pouvez relier sans soudure deux ou trois longueurs de fils ensemble pour réaliser un bobinage.

Vous aurez également besoin d'un aimant plus puissant. Le plus petit que j'ai utilisé pour cet essai était cylindrique, mesurant 25 mm de long pour 20 mm de diamètre et magnétisé axialement, ce qui signifie que le pôle nord et le pôle sud sont situés aux extrémités de son axe (ligne imaginaire passant par le centre du cylindre, parallèle à son côté incurvé).

La figure 5-18 vous montre le résultat de ce dispositif. L'aimant se trouve à droite. Les flasques de la bobine sont réalisés en contre-plaqué de 6 mm d'épaisseur, de diamètre 100 mm. Un morceau de tuyau en PVC de 20 mm de diamètre est placé en son centre ; son diamètre est légèrement supérieur à celui de l'aimant, ce qui permet à ce dernier de glisser librement à l'intérieur.



Figure 5-18. Bobinage de 200 spires de fil de câblage sur une bobine en contre-plaqué et un aimant plaqué sur une vis fixée sur une tige en bois.

Enfoncez les rondelles de bois sur le tuyau, afin de créer une bobine. Il vous faut maintenant enrouler 200 tours de fil – en prenant soin de laisser dépasser le fil placé à l'intérieur du bobinage (percez un petit trou sur l'un des flasques en contre-plaqué, près de son centre, et faites ressortir le fil au travers).

La largeur du bobinage que vous allez réaliser doit être égale à la longueur de l'aimant et celui-ci, en couissant à l'intérieur du tube, doit pouvoir ressortir complètement, des deux côtés. La vue en coupe de la bobine (figure 5-19) montre ce que vous devez réaliser. Afin de maintenir convenablement l'aimant, j'ai percé un trou à l'une des extrémités d'un bâtonnet de bois de 13 mm de diamètre et y ai fixé la vis de 3 mm à tête plate. De cette façon, je pouvais tenir le bâton de bois comme une poignée à laquelle était attaché l'aimant attiré par la vis.

Nous voici parvenus à l'instant magique. Utilisez une paire de fils de test munis de pinces crocodiles afin de relier les fils de votre multimètre à la bobine et réglez-le pour mesurer des volts, comme précédemment. Cette fois, prévoyez de mesurer une tension de 2 V.

L'aimant étant au bout du bâton de bois, enfoncez-le à l'intérieur du tuyau de PVC et retirez-le le plus rapidement possible, de façon répétitive. Alternativement, vous pouvez le retirer du bâton de bois et l'insérer dans le tuyau, puis le faire passer alternativement d'une extrémité à l'autre du tuyau avec vos doigts. Si vous le faites correctement, vous devriez mesurer une tension d'environ 0,8 V.

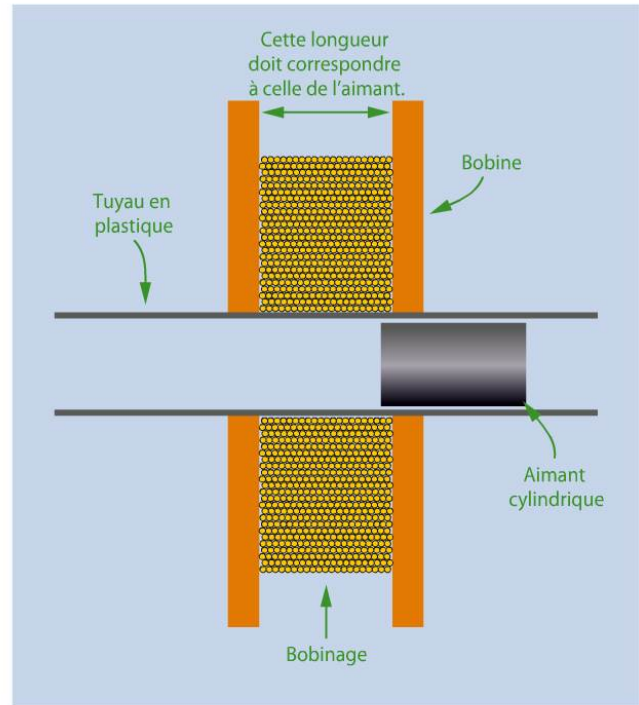


Figure 5-18. Montage produisant assez d'énergie pour allumer une LED.

Tant de travail pour obtenir une tension inférieure à 1 V !

En fait, votre multimètre fait la moyenne de la tension. Chaque impulsion a probablement une tension de pointe supérieure.

Débranchez les fils de votre multimètre et reliez-les à une LED à faible consommation. Attachez la LED afin qu'elle ne s'échappe pas. Déplacez vigoureusement l'aimant ; vous devriez maintenant voir la LED clignoter. Si ce n'est pas le cas, inversez le sens de l'aimant dans le tube et réessayez. Il est absolument nécessaire que vous utilisiez une LED à faible consommation pour que cela fonctionne.

Améliorations possibles

En dépensant un peu plus, vous obtiendrez un résultat plus impressionnant.

En priorité, utilisez un aimant plus puissant. J'ai obtenu des résultats excellents en utilisant un aimant de 15 mm de diamètre et de 50 mm de long. Vous devrez bien entendu utiliser un tuyau de PVC de diamètre supérieur pour faire tenir l'aimant.

Ensuite, procurez-vous une bobine de fil émaillé. J'en ai utilisé environ 150 m de 0,4 mm de diamètre. Il est facile d'en trouver sur Internet.

Si vous avez de la chance, votre fil magnétique sera conditionné sur une bobine en plastique dont le diamètre du trou sera légèrement supérieur au diamètre de votre aimant. Mieux encore, l'extrémité du fil à l'intérieur de la bobine pourrait être accessible, près de son centre, comme on le voit, entouré en rouge, sur la figure 5-20.



Figure 5-20. Bobine de fil émaillé dont le fil central est accessible (entouré de rouge).

Vous pouvez maintenant relier la LED aux extrémités du fil émaillé de la bobine (figure 5-21), puis générer une tension en déplaçant rapidement l'aimant.



Figure 5-21. Prêt pour générer de l'énergie électrique à petite échelle.

Si la bobine n'a pas la bonne dimension, ou si le fil n'est pas accessible, vous devrez bobiner le fil sur un autre support. Si vous disposez de 150 m de fil, vous devriez pouvoir enrouler environ 2 000 spires. À une vitesse de 4 tours par seconde, cela vous prendra environ 500 s, soit un peu moins de 10 mn.

La figure 5-22 montre un montage de taille plus importante, à titre de démonstration. Le bobinage en fil émaillé est maintenu par de la colle époxy, afin qu'il ne se défasse pas, et le tube est inséré dans un bloc de plastique qui le maintient fermement. L'aimant au néodyme reste collé à une vis située à l'extrémité d'un barreau d'aluminium, également visible sur la photo.

J'ai utilisé deux LED de forte puissance, reliées à la bobine avec leurs polarités opposées. Quand l'aimant est agité de haut en bas, les LED éclairent la pièce entière. Leurs polarités étant opposées, elles démontrent le sens du courant quand l'aimant traverse la bobine (figure 5-23).

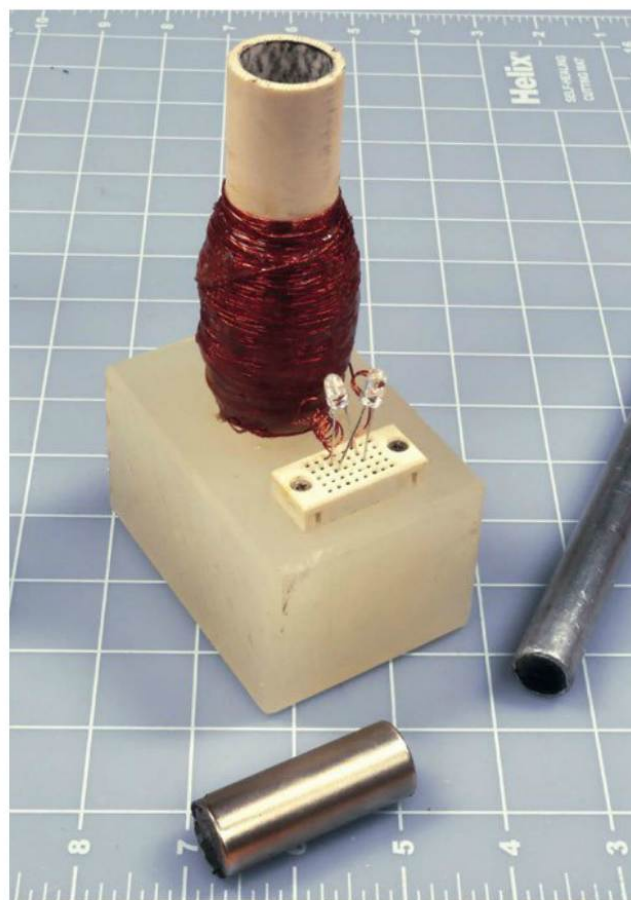


Figure 5-22. Circuit de démonstration procurant un résultat éblouissant.



Figure 5-23. Le générateur à LED en action.

Aimants : attention, danger !

Les aimants au néodyme peuvent se briser. Ils sont fragiles et peuvent se rompre s'ils entrent brutalement en contact avec un matériau métallique ou un autre aimant. C'est pour cela que leurs fabricants recommandent de porter des lunettes de protection.

Ils peuvent facilement vous *pincer la peau* et provoquer des pinçons voire pire. Les aimants exercent une force d'attraction qui augmente quand la distance avec un autre objet magnétique se réduit, leur attraction se termine rapidement et violemment. Aïe !

Les aimants ne font jamais de pause. En électronique, on considère que si un circuit n'est plus alimenté, il n'est plus nécessaire d'y prêter attention. Les aimants ne se comportent pas de cette façon. Ils ne cessent jamais d'être en interaction avec leur environnement et, s'ils détectent un objet métallique, ils se l'approprient *immédiatement*. Le résultat peut être dangereux, en particulier si l'objet est pointu et si vos mains sont proches. Quand vous manipulez

un aimant, réservez un espace libre suffisant, non magnétique, dépourvu de tout objet métallique, et n'oubliez pas de vérifier sous la surface de travail. Par exemple, un aimant avait détecté la présence d'une vis sous le plan de travail de ma cuisine, l'a plaquée de façon inattendue.

Il est difficile de prendre ces recommandations au sérieux avant que cela se produise. Pourtant, les aimants au néodyme ne sont pas des jouets. Manipulez-les avec précaution.

Souvenez-vous que *les aimants créent des aimants*. Les objets métalliques étant vulnérables aux champs magnétiques, pensez à les tenir éloignés des aimants. En particulier :

- les montres ;
- les smartphones ;
- les disques durs d'ordinateur ;
- les moniteurs informatiques (en particulier ceux équipés d'un tube cathodique) ;
- les cartes bancaires ;
- les téléviseurs ;
- les pacemakers.

Charger un condensateur

À partir du montage précédent, voici une autre expérience que vous pouvez réaliser. Déconnectez la LED de votre bobine et remplacez-la par un condensateur de 1 000 μF relié en série avec une diode 1N4001 (figure 5-24). Modifiez le réglage de votre multimètre pour qu'il mesure cette fois la tension continue (en volts), puis reliez-le aux bornes du condensateur.

Si votre multimètre propose un réglage de gamme manuel, ajustez-le pour mesurer une tension d'au moins 2 V. Assurez-vous que la connexion positive de la diode (celle qui est repérée par un anneau) est bien reliée au pôle positif du condensateur (le fil qui n'est pas repéré), de manière à ce qu'une tension positive traverse le condensateur, en passant par la diode.

Agitez vigoureusement l'aimant de haut en bas au travers de la bobine. Le multimètre devrait indiquer que le condensateur accumule une charge. Quand vous stoppez le mouvement de l'aimant, la tension mesurée devrait faiblir très lentement, principalement parce que le condensateur se décharge par la résistance interne de votre multimètre.

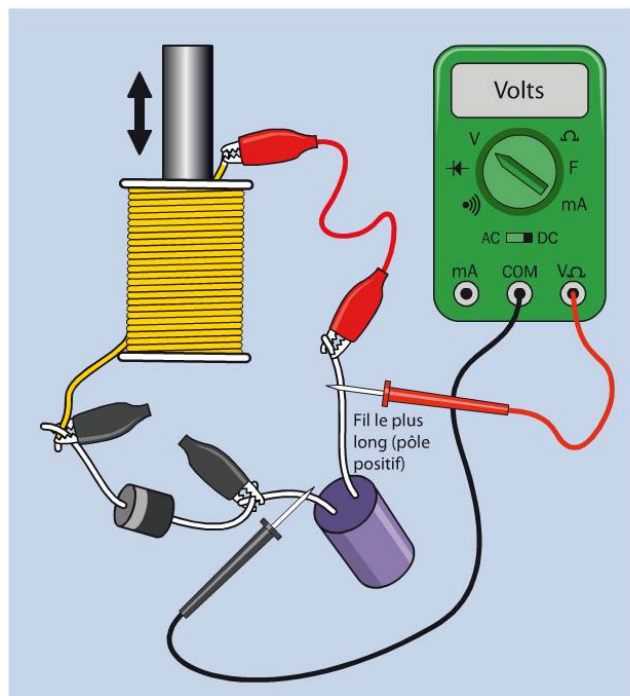


Figure 5-24. Une diode vous permet d'accumuler dans un condensateur l'énergie générée par votre bobine.

Cette expérience est plus importante qu'elle n'y paraît. Rappelez-vous que quand vous poussez l'aimant à l'intérieur de la bobine dans une direction, elle induit un courant dans un sens, et que si vous inversez le déplacement de l'aimant, elle induit un courant de sens opposé. Vous générez alors un courant alternatif.

La diode ne laisse passer le courant que dans un sens. Elle bloque son passage dans le sens opposé. C'est pourquoi le condensateur accumule sa charge. Si vous en concluez que les diodes permettent de convertir le courant alternatif en courant continu, vous avez parfaitement raison. On dit que la diode « redresse » la tension alternative.

Poursuivons par l'audio

Vous avez pu observer qu'un courant électrique traversant une bobine crée une force magnétique suffisante pour attirer à lui un petit objet métallique. Que se passe-t-il si la bobine est très petite et l'objet plus lourd ? Dans ce cas, c'est la bobine qui est attirée par l'objet métallique. Ce principe est au cœur des haut-parleurs.

Expérience 27 : démontez un haut-parleur

Pour comprendre comment fonctionne un haut-parleur, il n'y a pas de meilleure façon que de le démonter. Si vous hésitez à dépenser quelques euros dans une action destructive pourtant très instructive, récupérez un haut-parleur dans un appareil radio qui ne fonctionne plus. Vous pouvez aussi vous contenter d'observer les photos qui illustrent pas à pas le démontage.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 haut-parleur de diamètre minimal 5 cm
- 1 cutter

Procédure

La figure 5-25 est une vue arrière d'un petit haut-parleur. L'aimant est dissimulé dans la partie cylindrique sertie.



Figure 5-25. Vue arrière d'un petit haut-parleur.



Figure 5-26. Petit haut-parleur de 5 cm prêt pour le démontage.

Le haut-parleur, auquel on a retiré le cône de diffusion, est photographié sur la figure 5-27. La couronne ondulée au centre est une pièce flexible qui permet au cône de se déplacer, tout en évitant qu'il ne dévie latéralement.

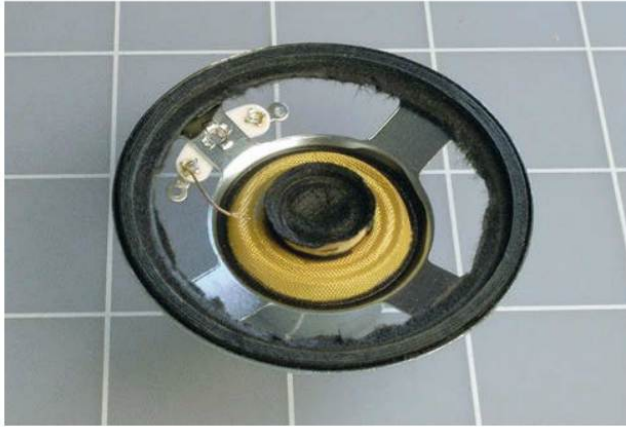


Figure 5-27. Le haut-parleur sans son cône diffuseur.

Découpez le pourtour de la collerette jaune ; vous devriez alors être en mesure de retirer le cylindre de papier sur lequel est enroulé un fil de cuivre (figure 5-28 ; j'ai retourné le cylindre, afin que le bobinage soit visible).



Figure 5-28. La bobine de cuivre est normalement dissimulée dans l'entrefer de l'aimant situé en dessous.

Les deux extrémités de ce bobinage reçoivent un signal électrique par l'intermédiaire de deux fils souples reliés à deux cosses situées au dos du haut-parleur. Quand la bobine est placée dans l'entrefer de l'aimant, elle réagit aux fluctuations du signal alternatif en exerçant une force d'attraction et de répulsion sous l'effet du champ magnétique. Ceci fait vibrer le cône du haut-parleur qui crée une onde sonore.

Le fonctionnement des gros haut-parleurs est exactement identique. Ils sont simplement équipés de plus gros aimants et de bobines pouvant supporter une puissance plus importante (pouvant dépasser 100 W).

Historique : les origines du haut-parleur

Une bobine se déplacera si son champ magnétique interfère avec un gros objet immobile. Si cet objet est un aimant permanent, la bobine réagira plus intensément, créant des vibrations plus importantes. C'est comme cela que fonctionne un haut-parleur.

L'idée est venue, en 1874, à Ernst Siemens, un inventeur allemand fécond qui a également construit le premier ascenseur électrique, en 1880. Aujourd'hui, Siemens AG est l'une des plus grandes sociétés d'électronique du monde.

Quand Alexander Graham Bell a breveté son téléphone, en 1876, il utilisait le concept de Siemens pour créer les fréquences audibles dans l'écouteur. À partir de cette époque, la qualité et la puissance des systèmes de reproduction sonore n'ont cessé d'augmenter, jusqu'à ce que Chester Rice et Edward Kellogg de la General Electric publient un article, en 1925, qui jetait les bases des principes encore utilisés de nos jours dans les haut-parleurs.

Sur le site <http://www.radiolaguy.com>, vous trouverez des photos de très beaux haut-parleurs anciens, qui utilisaient un pavillon pour augmenter leur efficacité, comme ceux de la figure 5-29. Les amplificateurs sonores devenant de plus en plus puissants, l'efficacité des haut-parleurs est devenue moins importante, par rapport à leur qualité sonore et au coût de leur fabrication. Les haut-parleurs actuels ne convertissent en énergie sonore qu'à peine 1 % de la puissance électrique qui leur est appliquée.



Figure 5-29. Ce magnifique haut-parleur Amplion AR-114X illustre les efforts des concepteurs pour augmenter l'efficacité, à une époque où les amplificateurs audio ne délivraient qu'une puissance limitée. Photos de « Sonny the Radiola Guy ».

Théorie : son-signal électrique-son

Il est maintenant temps de présenter plus précisément comment un son est transformé en électricité puis reconverti en onde sonore.

Supposez que quelqu'un tape sur un gong avec une mailloche, comme sur la figure 5-30. La face métallique plate du gong vibre, créant une onde acoustique audible par l'oreille humaine. Chaque onde comprimant l'air est suivie d'une onde qui le décompresse ; la longueur de l'onde sonore est la distance (généralement exprimée en mètres ou millimètres), qui sépare un pic de pression du suivant.

La fréquence du son est le nombre d'ondes sonores par seconde. Elle est généralement exprimée en hertz.

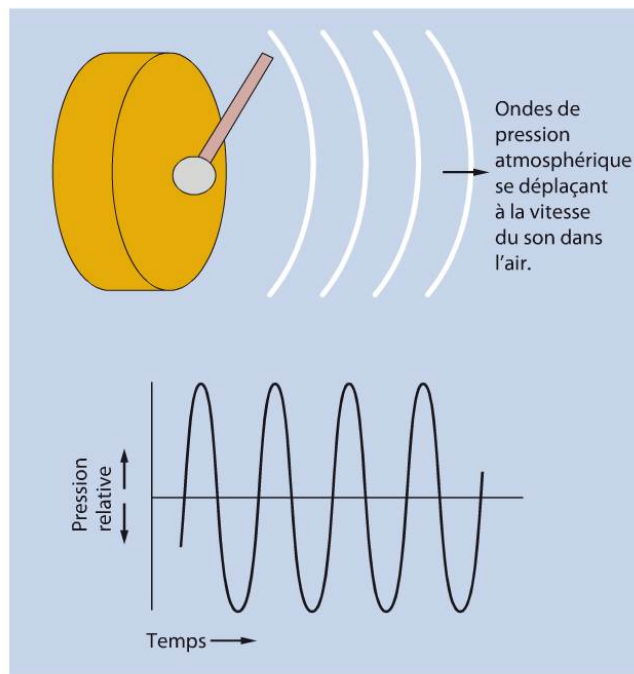


Figure 5-30. La frappe d'un gong fait vibrer sa surface plate. Les vibrations créent des ondes de pression atmosphériques.

Imaginons que nous plaçons une fine membrane en plastique sur le chemin des ondes. Le film de plastique va vibrer au rythme des ondes, comme le mouvement d'une feuille par le vent. Supposons maintenant que nous attachions une bobine au dos de cette membrane, afin qu'elle vibre également, et que nous plaçons un aimant fixe à l'intérieur de l'enroulement filaire. Cette association ressemble à un petit haut-parleur ultrasensible, sauf que c'est le son qui va produire un signal électrique et non l'inverse. Les ondes de pression vont faire vibrer la membrane selon l'axe de l'aimant et le champ magnétique créera des variations de tension dans l'enroulement (figure 5-31).

Ce dispositif est connu sous le nom de microphone à bobine mobile. Il existe d'autres façons de réaliser un microphone, mais cette configuration est la plus facile à comprendre. Bien entendu, la tension qu'il engendre est très faible, mais elle peut être amplifiée en utilisant au moins un transistor (figure 5-32).

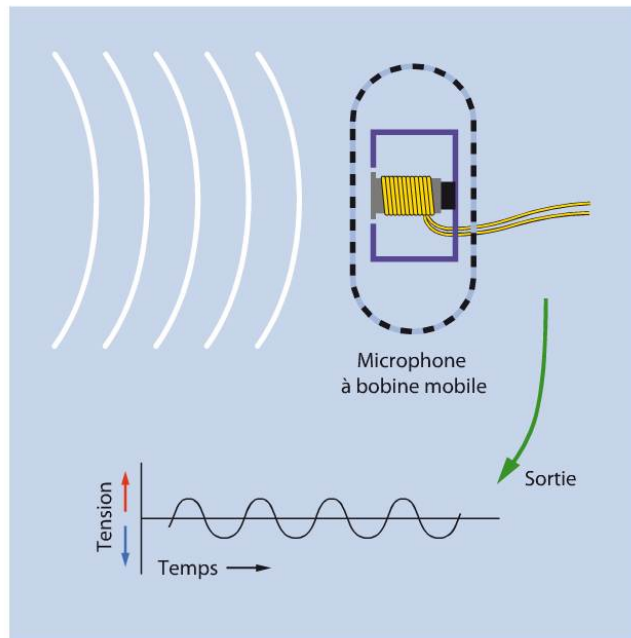


Figure 5-31. Les ondes sonores, en pénétrant dans un microphone, provoquent la vibration d'une membrane. Celle-ci est solidaire d'une bobine entourant un aimant. Les vibrations de la bobine induisent un faible courant.

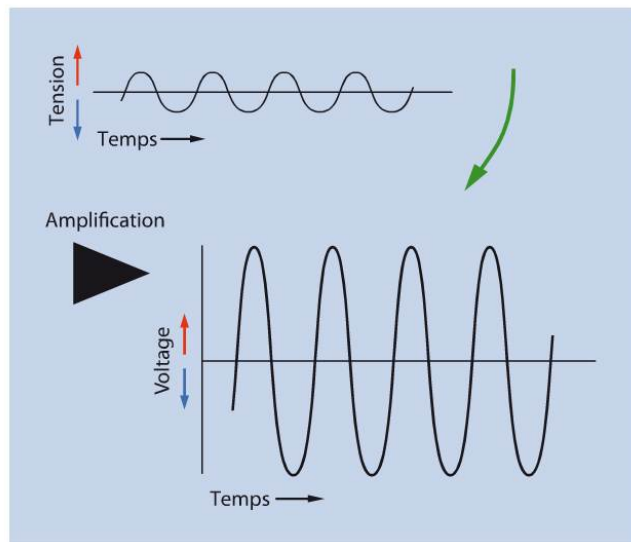


Figure 5-32. Les faibles signaux du microphone sont amplifiés, ce qui accroît leur amplitude en conservant leur fréquence et leur forme d'onde.

On peut alors transmettre le signal électrique amplifié à la bobine d'un haut-parleur qui va créer les ondes de pression atmosphériques (figure 5-33).

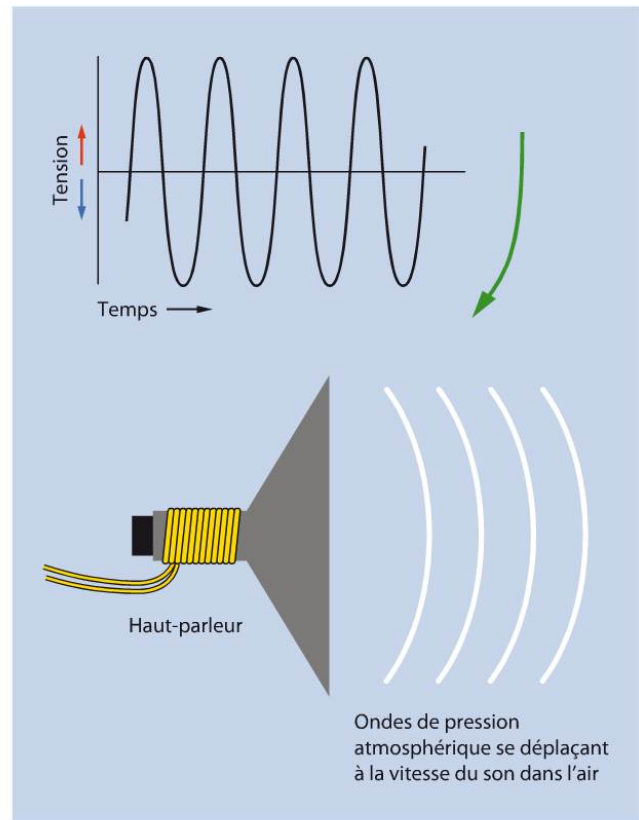


Figure 5-33. Le signal amplifié est transmis à la bobine d'un haut-parleur. Le champ magnétique induit par le signal provoque la vibration du cône, reproduisant ainsi le son original.

On peut interrompre le processus et enregistrer le son, pour le reproduire ultérieurement, mais le principe reste le même. La partie la plus délicate est la conception du microphone, de l'amplificateur et du haut-parleur afin qu'ils reproduisent fidèlement les formes d'ondes. C'est un défi important, la reproduction sonore de qualité est délicate.

Expérience 28 : faites réagir une bobine

Lorsqu'un courant traverse une bobine, il crée un champ magnétique. Quand vous interrompez le courant, l'énergie du champ créé est reconvertie en une brève impulsion électrique. On dit que cela arrive quand le champ s'effondre.

Cette expérience va vous permettre de le constater par vous-même.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 2 LED à faible consommation
- 1 bobine d'environ 30 m de fil de câblage de jauge 22 ou, de préférence, 26 (diamètre 0,4 mm)
- 1 résistance de 47 Ω
- 1 condensateur de capacité 1 000 μF ou supérieure
- 1 interrupteur tactile

Procédure

Observez le schéma de la figure 5-34 et sa version sur une plaque de montage (figure 5-35). Vous pouvez utiliser une bobine de fil de jauge AWG 22. Alternativement, si durant l'expérience 26, vous avez réalisé votre propre bobinage avec 60 m de fil, utilisez-la ; et si vous avez consenti à la dépense d'une bobine de fil émaillé, ce sera encore mieux.

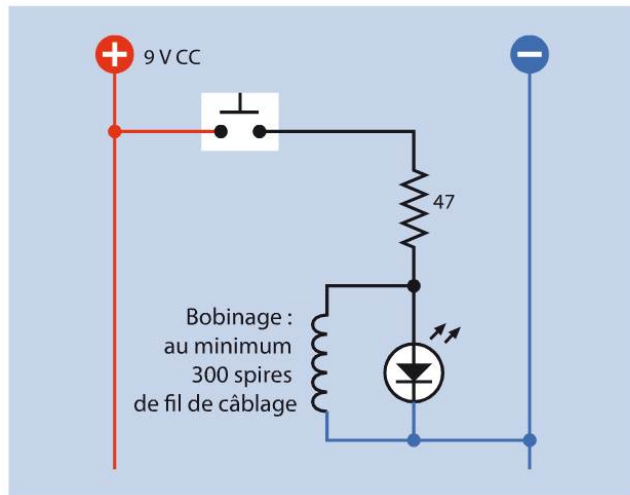


Figure 5-34. Circuit simple, démontrant l'inductance d'une bobine.

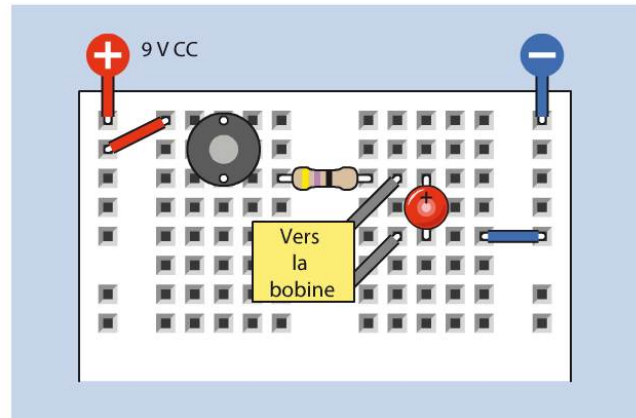


Figure 5-35. Plaque de montage de l'expérience d'auto-induction.

Le schéma ne semble pas avoir de sens. La résistance de 47 Ω paraît trop petite pour protéger la LED – mais pourquoi la LED s'allumerait-elle, puisque le courant électrique traverse la bobine en l'évitant ?

Testez le circuit, je pense que vous allez être surpris. Chaque fois que vous appuyez sur l'interrupteur, la LED s'allume brièvement.

Essayez d'ajouter une seconde LED (figures 5-36 et 5-37) et appuyez à nouveau sur le bouton. La première LED s'allume, comme précédemment, mais maintenant, quand vous relâchez le bouton, la seconde LED s'allume brièvement à son tour.

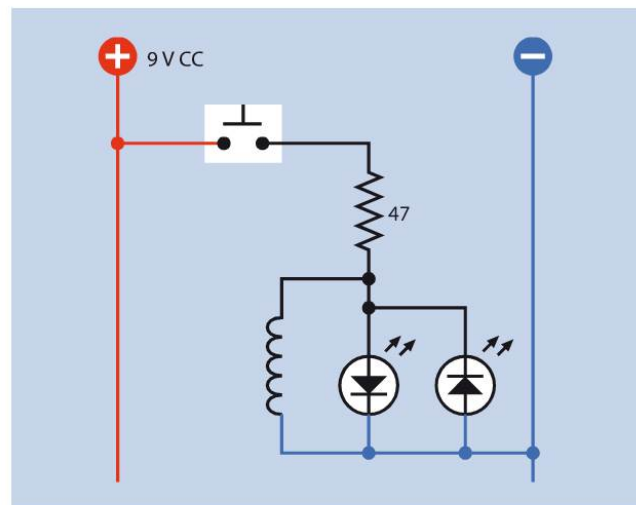


Figure 5-36. L'une des LED s'allume brièvement quand le champ magnétique se crée, l'autre s'allume quand le champ magnétique s'effondre.

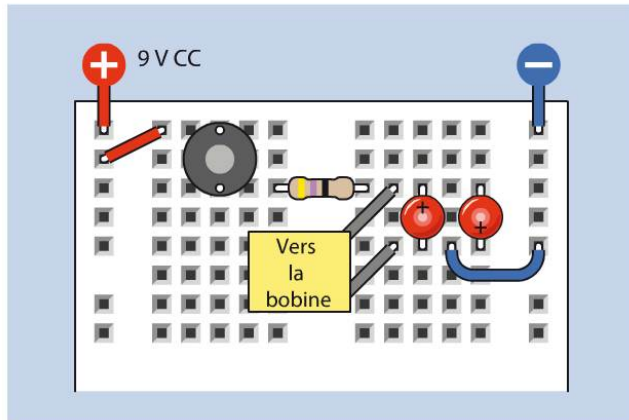


Figure 5-37. Version montée du circuit de démonstration utilisant deux LED.

L'effondrement du champ

Voici ce qui s'est passé dans cette expérience. Au début, la bobine a eu besoin d'un peu de temps pour créer le champ magnétique. Pendant ce temps, elle a bloqué le passage du courant, qui est donc passé au travers de la première LED. Une fois le champ magnétique établi, le courant traversait normalement la bobine.

Le comportement de la bobine s'appelle l'*auto-induction*. Certaines personnes utilisent le terme *réactance inductive*, ou plus simplement *réactance*, mais le terme correct est *auto-induction*, c'est celui que j'utiliserai.

Quand vous interrompez l'alimentation, le champ magnétique s'effondre et son énergie se convertit en électricité, créant une très courte impulsion. C'est ce qui a provoqué l'allumage de la seconde LED, quand vous avez relâché l'interrupteur.

La quantité d'énergie stockée et libérée dépend évidemment de la taille de la bobine.

Durant l'expérience 15, je vous avais recommandé de placer une diode en parallèle avec la bobine d'un relais, afin d'absorber la pointe de tension qui se produisait quand le relais était activé ou désactivé. Vous comprenez maintenant ce phénomène.

Résistances, condensateurs et inductances

En électronique, les trois principaux types de composants passifs sont les résistances, les condensateurs et les inductances. Nous pouvons maintenant énumérer leurs propriétés et les comparer.

- Une *résistance* s'oppose au passage du courant et réduit la tension.
- Un *condensateur* permet à une impulsion de le traverser, mais il bloque le courant continu.
- Une *bobine* (souvent appelée *inductance*) bloque initialement le passage du courant continu, mais en autorise ensuite continuellement le passage.

Dans le circuit que je viens de vous montrer, je n'ai pas utilisé une résistance de forte valeur, car je savais que la bobine ne donnerait qu'une très brève impulsion. L'allumage de la LED aurait été moins visible si j'avais utilisé une résistance de valeur plus habituelle de $330\ \Omega$ ou $470\ \Omega$.

N'essayez pas ce circuit sans la bobine, cela détruirait les LED. L'inductance semble sans effet, mais ce n'est pas le cas.

Voici une dernière variante de cette expérience, pour vérifier votre mémoire et votre compréhension des phénomènes électriques fondamentaux. Réalisez le nouveau circuit utilisant un condensateur de $1\ 000\ \mu\text{F}$ au lieu de la bobine (figures 5-38 et 5-39). Faites attention au respect de la polarité du condensateur, le fil positif devant se trouver vers le haut. Utilisez également une résistance de $470\ \Omega$, car la bobine n'est plus présente pour bloquer et dériver le courant.

Pour commencer, maintenez appuyé le bouton B pendant une à deux seconde(s), afin d'être sûr que le condensateur soit déchargé. Qu'allez-vous observer en appuyant sur le bouton A ? Rappelez-vous : un condensateur transmet une impulsion initiale. En conséquence, la LED du bas va s'allumer – puis graduellement s'éteindre, car le condensateur accumule une charge positive sur son armature supérieure et une charge négative sur son armature inférieure. Pendant ce temps, la tension aux bornes de la LED du bas diminue jusqu'à devenir nulle.

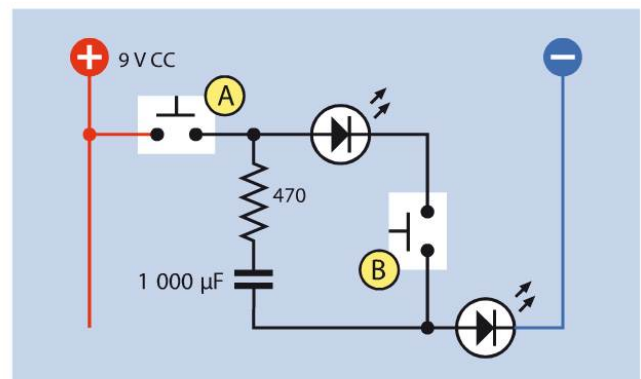


Figure 5-38. En de nombreux aspects, le comportement d'un condensateur est à l'opposé de celui d'une bobine.

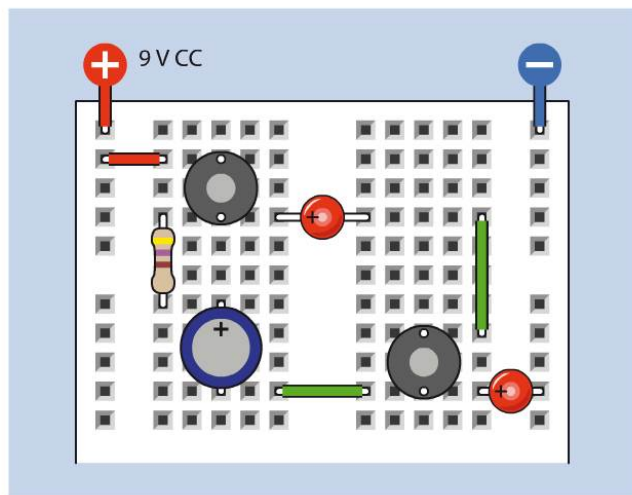


Figure 5-39. Réalisation du circuit de démonstration avec un condensateur.

Le condensateur est maintenant chargé. Si vous appuyez sur le bouton de droite, le condensateur se décharge à travers la LED supérieure. Vous pouvez voir cela comme un équivalent de l'expérience de la figure 5-37, mais en utilisant un condensateur, au lieu d'une inductance.

Les condensateurs et les inductances accumulent tous deux de l'énergie. Vous avez pu le constater de façon plus évidente avec le condensateur, car un condensateur de forte valeur est beaucoup plus petit qu'une inductance de valeur importante.

Théorie : principes du courant alternatif

Voici une expérience simple. Imaginez que vous configurez un temporisateur 555 pour envoyer un flux d'impulsions au travers d'une bobine. C'est une forme primitive de courant alternatif.

Pensez-vous que l'auto-induction de la bobine interférera avec le flux d'impulsions ? Cela dépendra la durée de chaque impulsion et de la valeur de l'inductance de la bobine. Si la fréquence des impulsions est correcte, l'auto-induction de la bobine durera juste le temps nécessaire au blocage de chaque impulsion. Puis la bobine récupérera à temps pour pouvoir bloquer la suivante. En association avec une résistance (ou simplement la résistance d'un haut-parleur), une inductance peut supprimer certaines fréquences tout en permettant que d'autres passent.

Si vous possédez un système stéréophonique qui utilise un petit haut-parleur pour reproduire les sons aigus et un plus gros pour reproduire les sons de basses fréquences, il

y a probablement une inductance dans l'enceinte acoustique, pour empêcher les fréquences élevées d'atteindre le gros haut-parleur.

Que se passe-t-il si vous remplacez l'inductance par un condensateur ? Si les impulsions alternatives durent suffisamment longtemps par rapport à la valeur du condensateur, il aura tendance à les bloquer. Cependant, si les impulsions sont courtes, le condensateur se chargera à leur rythme et les transmettra.

La place me manque pour traiter en profondeur les principes du courant alternatif. C'est un domaine vaste et complexe, dans lequel l'électricité se comporte de façon aussi étrange que fascinante. Quant aux supports mathématiques qui le décrivent, ils peuvent s'avérer assez ardues, faisant intervenir équations différentielles et nombres complexes.

La prochaine expérience va démontrer les effets que je viens juste d'énoncer.

Expérience 29 : filtrez certaines fréquences

Dans cette expérience, vous allez modifier la sonorité d'un son. En utilisant des inductances et des condensateurs, on peut filtrer certaines parties du spectre audible dans le but de créer une importante variété d'effets.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre
- 1 source d'alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 haut-parleur d'impédance 8Ω , de diamètre minimal 10 cm
- 1 circuit intégré amplificateur audio LM386
- 1 bobine d'environ 100 m de fil de jauge AWG 22
- 1 petit coffret en plastique pour loger le haut-parleur
- 1 temporisateur 555
- 2 résistances de 10K
- 3 condensateurs de $0,01 \mu\text{F}$, 1 de $2,2 \mu\text{F}$, 1 de $100 \mu\text{F}$ et 3 de $220 \mu\text{F}$
- 1 potentiomètre ajustable de 10K et 1 de 1M
- 4 interrupteurs à glissière SPDT
- 1 interrupteur tactile

Le coffret de votre haut-parleur

Le petit haut-parleur que j'ai recommandé pour les projets précédents convenait quand on devait diffuser quelques bips, mais présente des limitations pour la reproduction des fréquences basses. Pour entendre la façon dont certains composants électroniques modifient les notes basses, il faut utiliser un haut-parleur plus grand (figure 5-40), avec un cône de 10 cm de diamètre.



Figure 5-40. Haut-parleur convenant à ce projet.

Si vous vous rappelez ce que j'ai dit précédemment concernant la nécessité de supprimer les ondes sonores en opposition de phase, produites par l'arrière d'un haut-parleur, vous devez le placer dans une boîte. Elle jouera également le rôle de caisse de résonance, de la même manière qu'une guitare acoustique suit les vibrations des cordes.

Une boîte en contre-plaqué serait idéale, mais un simple coffret en plastique avec un couvercle emboîtable convient également, sans être trop onéreux (figure 5-41). Percer proprement des trous dans le plastique n'est pas facile, n'y consacrez pas trop de temps.

Afin d'améliorer les caractéristiques acoustiques de votre boîte, vous pouvez en garnir l'intérieur de tissu épais et doux, avant de refermer son couvercle. Une serviette éponge ou des chaussettes devraient absorber les vibrations.



Figure 5-41. Une caisse de résonance est nécessaire si vous voulez entendre des basses de votre haut-parleur. Une boîte de rangement économique est suffisante pour cette démonstration.

Un seul circuit intégré

Dans les années 1950, il était nécessaire d'utiliser des tubes à vide, des transformateurs et d'autres composants lourds et énergivores, pour construire un amplificateur. Aujourd'hui, vous pouvez vous procurer pour environ 1 € un circuit intégré qui fera l'affaire, en lui ajoutant quelques condensateurs et un contrôle de volume.

Le plus simple, le plus économique et le plus facile à utiliser est le LM386, disponible chez de nombreux fabricants, chacun faisant précéder ou suivre sa référence par des lettres ou des chiffres. Le LM386N-1, le LM386N et le LM386M-1 sont à peu près identiques pour notre usage. Assurez-vous uniquement de ne pas acheter un type à montage en surface. Le brochage de cet amplificateur est représenté sur la figure 5-42.

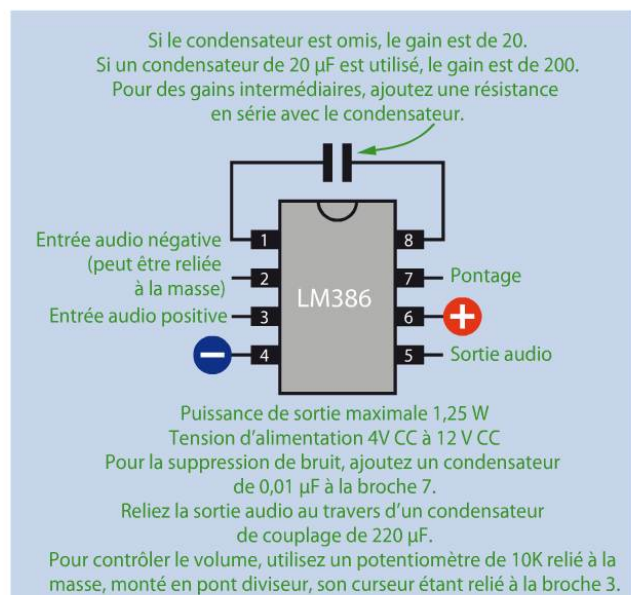


Figure 5-42. Brochage du circuit intégré amplificateur LM386.

Ce petit circuit intégré fonctionne avec une tension d'alimentation comprise entre 4 V CC et 12 V CC. Bien qu'il ne délivre qu'une puissance de 1,25 W, vous serez surpris par sa sonorité. Il offre un gain nominal de 20.

Test sonore

Pour le test, j'ai besoin d'une source de fréquences couvrant une large bande du spectre sonore audible. L'utilisation d'un temporisateur 555 permet d'y parvenir simplement. Le schéma de la figure 5-43 montre le temporisateur en haut, avec les composants nécessaires pour générer une fréquence comprise entre 70 Hz et 5 kHz environ, en réglant le potentiomètre ajustable de 1M. Malheureusement, la progression n'est pas linéaire, vous constaterez qu'une faible variation du potentiomètre aura plus d'impact aux fréquences élevées qu'aux fréquences basses. Néanmoins, cela suffit dans le cadre d'une démonstration et celle du filtrage audio est plus probante avec des fréquences basses.

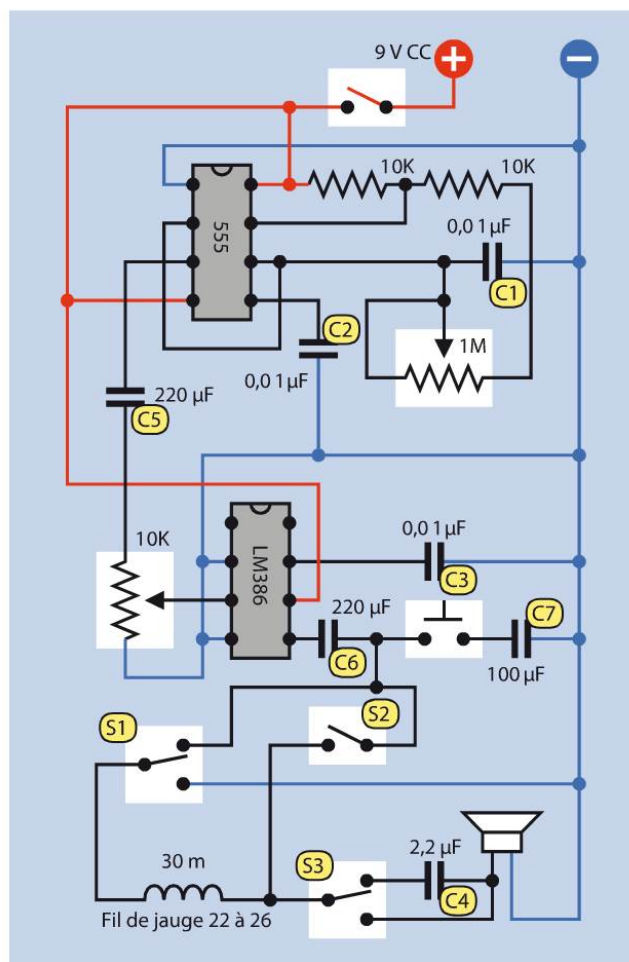


Figure 5-43. Circuit d'expérimentation audio simple.

La version câblée sur plaque de montage de ce circuit est représentée sur la figure 5-44 et les valeurs des composants sont indiquées sur la figure 5-45.

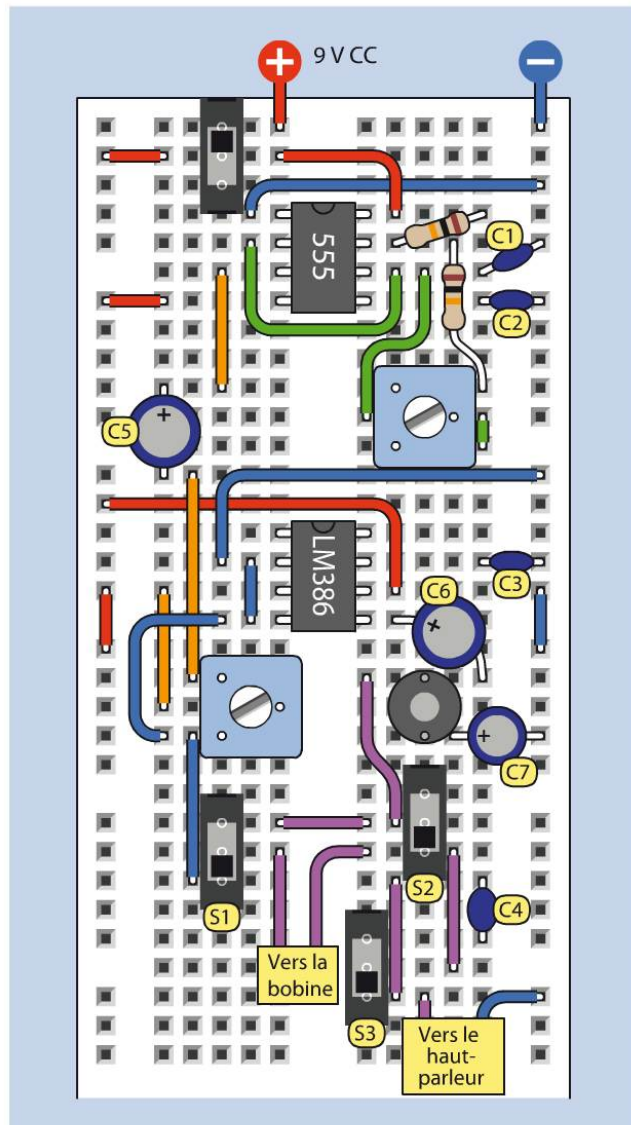


Figure 5-44. Plaque de montage du circuit d'expérimentation audio.

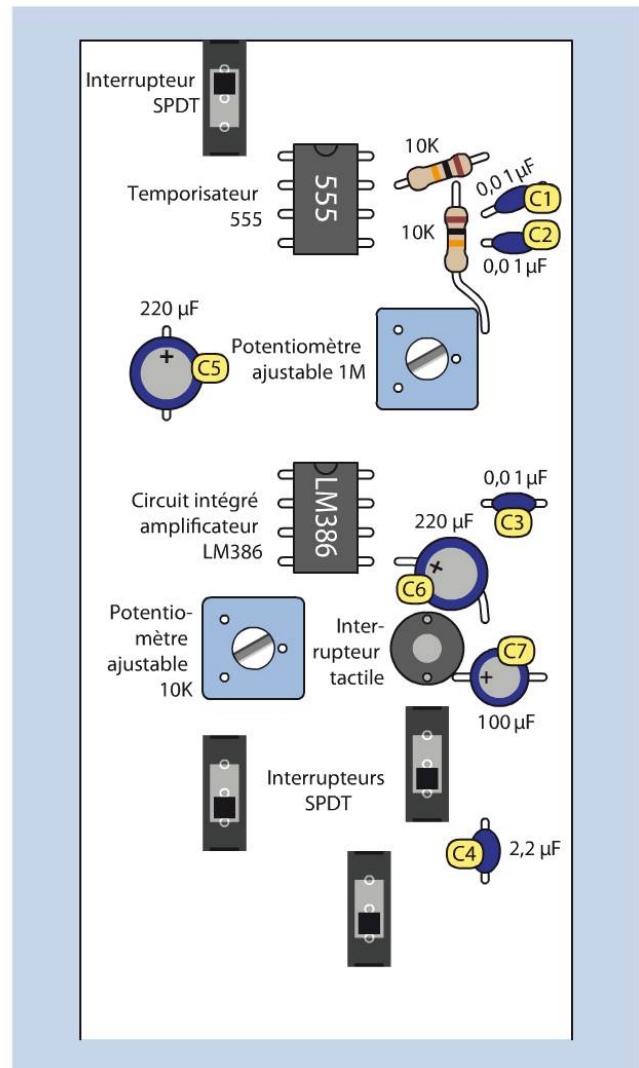


Figure 5-45. Valeurs des composants du circuit d'expérimentation audio.

En ce qui concerne le montage de ce circuit, je dois vous avertir que les amplificateurs sont sensibles à toutes les fluctuations électriques, pas uniquement celles que vous souhaitez entendre. Toute interférence électrique sera reproduite comme un méli-mélo de sifflements et de crachements parasites. Ce problème sera encore plus désagréable si vous utilisez de longues connexions pour relier les composants.

Les fils de liaison comportant des petits connecteurs à leurs extrémités sont particulièrement indésirables dans un circuit amplificateur, car ils se comportent comme des antennes radio. J'ai essayé de raccourcir au minimum les longueurs de tous les fils de la plaque de montage

(figure 5-44) et je vous encourage à en faire de même. Seule la longueur de la liaison de sortie de l'amplificateur vers le haut-parleur et celle de la liaison à la bobine ne sont pas critiques.

En ce qui concerne la bobine, du fil de câblage de jauge AWG 22 ou plus fin sera parfait, mais il vous faut compter une longueur de fil bobiné d'au moins 30 m pour constater un effet audible. La bobine de 200 m spécifiée dans l'expérience précédente serait mieux adaptée.

Avant de mettre sous tension la plaque de montage, assurez-vous que les deux interrupteurs placés vers le bas du montage soient bien en « position basse ». En d'autres termes, manœuvrez-les vers le bas de la platine d'essai. Réglez également les potentiomètres ajustables à mi-course.

Ce projet peut être alimenté par un adaptateur secteur ou une pile de 9 V, sans qu'aucune régulation ne soit nécessaire. Toutefois, si vous utilisez un adaptateur secteur, vous pourriez entendre un ronflement. Ce bruit parasite est réductible en ajoutant un condensateur de 1 000 μF entre les deux bus d'alimentation de la plaque de montage. Si vous utilisez une pile, la consommation de l'amplificateur va limiter sa durée de vie à deux ou trois heures et certains sons vont faire chuter légèrement la tension, provoquant une modification de la fréquence audible générée par le temporisateur 555.

Dès que l'alimentation est appliquée, vous devez entendre une tonalité. S'il n'en n'est pas ainsi, recherchez la panne, en commençant par déconnecter le condensateur de 222 μF de la broche de sortie du temporisateur 555 et reliez très brièvement les fils de votre haut-parleur entre cette broche et la masse. Si vous n'entendez rien, c'est qu'il y a une erreur de câblage dans les circuits du temporisateur. Si vous entendez une tonalité, l'erreur vient des liaisons de l'amplificateur LM386.

Assurez-vous d'avoir correctement relié l'alimentation du circuit intégré LM386. Les broches d'alimentation positive et de la masse ne sont pas les mêmes que celles d'un circuit intégré logique.

Toujours pas de son ? Débranchez l'extrémité haute du petit fil bleu placé au-dessus du potentiomètre de 10K. Touchez cette extrémité avec votre doigt ; vous devez alors entendre un ronflement, car il s'agit de l'entrée de l'amplificateur (broche 4). Toujours rien ? Essayez de relier le haut-parleur entre le pôle négatif du condensateur C6 et la masse. C6 est le condensateur de couplage relié à la broche de sortie du LM386.

Si toutes ces tentatives échouent, vous devez vérifier les tensions en divers points du circuit, avec votre multimètre.

Aventures audio

Considérons que votre circuit fonctionne. Avant de commencer les essais, étudions le rôle de chaque composant (figure 5-44).

Le condensateur C1 associé au potentiomètre ajustable de 1M définit la fréquence du temporisateur. Si vous souhaitez entendre un son plus aigu, au-delà de 5 kHz, remplacez-le par un condensateur de 0,0068 μF (6,8 nF).

C5 est le condensateur de couplage. Sa valeur est élevée, afin qu'il se comporte comme un court-circuit pour une grande plage de fréquences. Son rôle consiste à bloquer le passage de la tension continue de la sortie du temporisateur, car on souhaite amplifier les variations de cette tension de sortie et non pas sa valeur continue.

C6 est un autre condensateur de couplage, qui protège le haut-parleur de la tension continue délivrée par la sortie de l'amplificateur.

Le condensateur C7 relie la sortie de l'amplificateur à la masse par l'intermédiaire de l'interrupteur placé à côté. La valeur de C7 a été choisie afin qu'il élimine les fréquences hautes, en les dérivant vers la masse. Sans ces fréquences, le son émis par le haut-parleur semblera plus feutré.

Le condensateur C4 est relié au circuit par l'interrupteur S3. Quand S3 est basculé vers le haut, la tonalité du temporisateur 555 passe au travers de C4 avant de rejoindre le haut-parleur. C4 ayant une valeur relativement faible, il bloque des fréquences basses, ce qui produit un son métallique.

La partie la plus compliquée de ce circuit est relative à la bobine. Je souhaite que vous entendiez la différence quand la bobine est reliée en parallèle ou en série avec le haut-parleur. C'est grâce aux interrupteurs S1 et S2 que le parcours du courant est modifié (figures 5-46 et 5-47). Quand la bobine est reliée en parallèle avec le haut-parleur, on dit que l'on dévie le son de celui-ci.

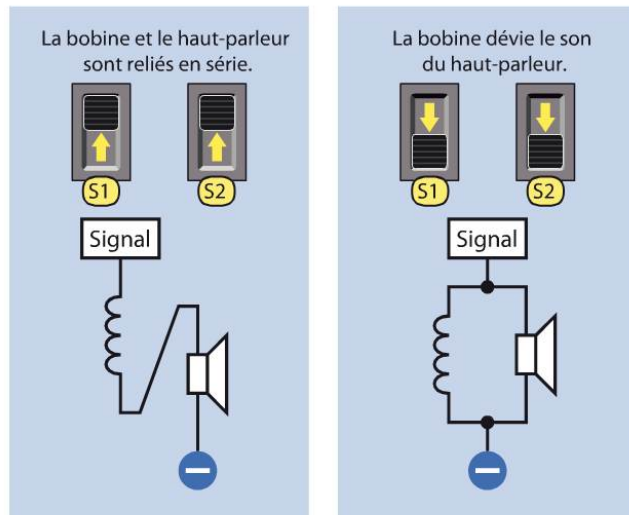


Figure 5-46. Les interrupteurs S1 et S2 (identifiés ainsi sur la platine de montage), relient la bobine externe, soit en parallèle avec le haut-parleur, soit en série.

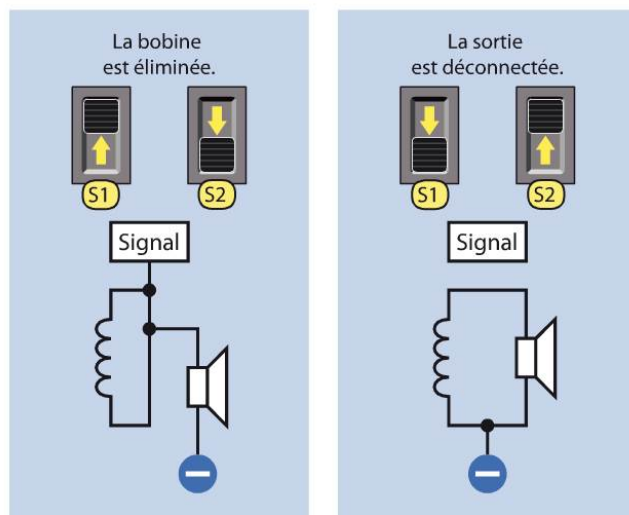


Figure 5-47. Deux autres configurations des interrupteurs S1 et S2 éliminent la bobine, ou interrompent la liaison entre l'amplificateur et le haut-parleur.

Vous pouvez maintenant réaliser beaucoup d'essais, particulièrement si vous ajustez la fréquence et le volume du son pendant les différents tests. Vous pouvez également tester les effets produits par l'utilisation simultanée des deux filtres. Par exemple, appuyez sur le bouton qui connecte le condensateur de dérivation C7, ce qui élimine les fréquences hautes, tout en reliant C4, qui lui coupe les fréquences basses. Vous avez ainsi un *filtre passe-bande*, nommé ainsi car il ne laisse passer qu'une bande étroite de fréquences intermédiaires.

Le potentiomètre ajustable en bas et à gauche sert à contrôler le volume. Vous constaterez qu'il n'est efficace qu'en milieu de course. Si vous le réglez trop haut ou trop bas, le circuit pourrait osciller. C'est un problème connu dans les circuits amplificateurs. La solution consiste à ajouter deux condensateurs, un de faible valeur et l'autre de capacité plus importante, en divers points du circuit.

Les condensateurs et la bobine de ce circuit forment un circuit *passif*. Ils bloquent certaines fréquences sans les renforcer. Un système plus élaboré de filtrage audio utilise des transistors pour un filtrage *actif*, mais cela suppose l'utilisation de nombreux composants.

Théorie : formes d'onde

Si vous soufflez dans une bouteille, le son mélodieux que vous entendez est dû aux vibrations de l'air. Si vous pouviez visualiser ces ondes de pression, vous pourriez constater qu'elles ont un profil bien particulier.

Si le temps pouvait être ralenti, le tracé de la tension alternative délivrée au niveau d'une prise électrique de votre habitation présenterait ce même profil.

Le graphe représentant la vitesse de balancement d'un pendule dans le vide, par rapport au temps correspondrait encore à ce même profil.

Ce profil est une *onde sinusoïdale*, ainsi appelée parce que vous l'obtenez à partir des principes de base de la trigonométrie. Dans un triangle rectangle, le sinus d'un angle est égal à la longueur du côté opposé, divisée par celle de l'hypoténuse.

Plus simplement, imaginez une balle attachée à une corde tournant autour d'un point central (figure 5-48). Ignorez la force de gravitation, la résistance de l'air et toute autre variable. À intervalles de temps réguliers, alors que la balle tourne à vitesse constante, mesurez la hauteur de la balle et divisez-la par la longueur de la corde. Tracez un graphique de ces mesures, vous obtiendrez une sinusoïde (figure 5-49). Remarquez que quand la balle passe sous l'axe horizontal de sa trajectoire, on considère que la distance est négative, ainsi que la sinusoïde.

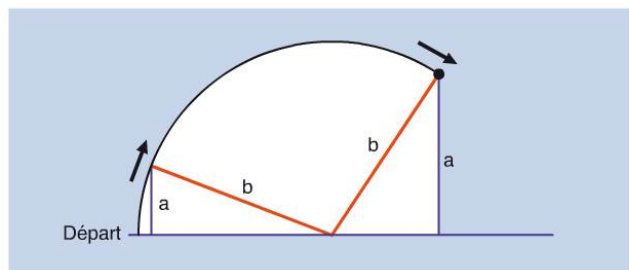


Figure 5-48. Vous pouvez tracer une sinusoïde à partir d'une figure géométrique simple.

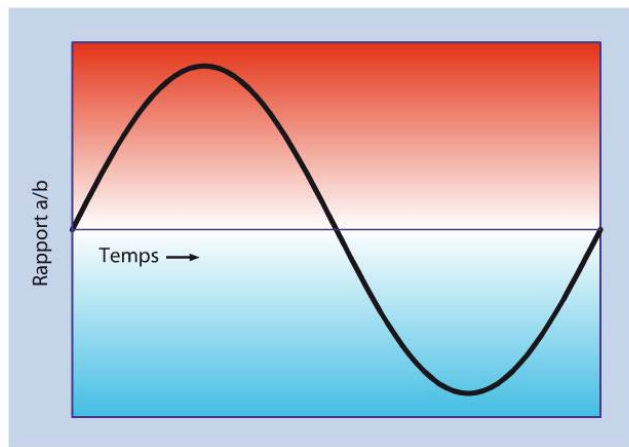


Figure 5-49. Une onde sonore sinusoïdale peut être générée par un instrument qui fait vibrer une colonne d'air, comme une flûte. C'est un son harmonieux.

Comment se fait-il que cette courbe si particulière se retrouve dans tant de phénomènes naturels ? La physique fournit des réponses, mais je vous laisse explorer plus amplement ce sujet, si cela vous intéresse.

Revenons à la reproduction sonore. Il faut retenir que :

La pression constante de l'air qui nous environne est appelée la pression ambiante. Elle résulte de l'attraction de l'air par la force de gravité ; oui, l'air a un certain poids. Tout son peut être considéré comme une onde de pression supérieure à la pression ambiante, suivie d'une onde de pression inférieure à la pression ambiante, exactement comme les vagues de l'océan.

On peut représenter les vagues de haute et de basse pression par des tensions relativement élevées et basses ; c'est pourquoi j'ai utilisé un fond rouge et bleu sur la figure 5-49.

Toute onde sonore peut se décomposer en une série d'ondes sinusoïdales de fréquences et d'amplitudes variables.

Inversement :

En combinant différentes ondes sinusoïdales audio, on peut créer *n'importe quel son*.

Imaginons que deux sons soient émis simultanément. La figure 5-50 illustre l'un d'eux par une courbe violette et l'autre par une courbe verte. Quand les deux sons se déplacent, comme des ondes de pression dans l'air ou comme des courants électriques alternatifs dans un fil, leurs amplitudes s'additionnent pour créer une courbe plus complexe, tracée en noir. Essayez à présent d'imaginer des dizaines, voire des centaines de fréquences ajoutées les unes aux autres et vous comprendrez combien la forme d'onde d'un morceau de musique est complexe.

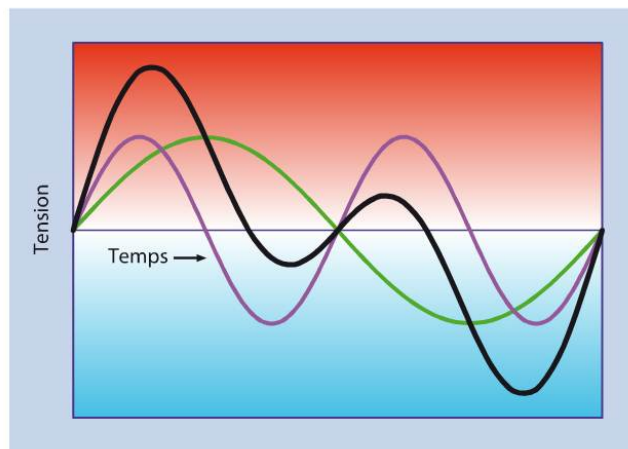


Figure 5-50. Quand deux ondes sinusoïdales sont générées simultanément (par exemple, par deux musiciens jouant de la flûte), le son résultant se traduit par une courbe composée. La fréquence de l'onde sinusoïdale violette est le double de celle de l'onde sinusoïdale verte. La courbe composée noire est la somme des hauteurs des deux ondes sinusoïdales, par rapport à l'axe horizontal du graphique.

Un temporisateur 555 en mode multivibrateur génère une onde carrée. Cela tient au fait que sa sortie passe brutalement de l'état bas à l'état haut et inversement (figure 5-51).

Une onde sinusoïdale est agréable et mélodieuse, car elle varie progressivement. Une onde carrée tend à résonner de façon dure et s'accompagne d'une sorte de « sifflement ». Ce sifflement est composé d'harmoniques, qui sont des fréquences multiples de la fréquence de base.

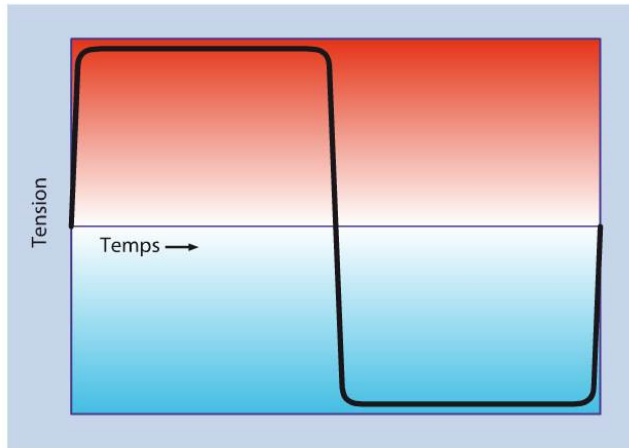


Figure 5-51. Signal carré fourni par une source telle que le temporisateur 555, qui commute sa sortie de façon abrupte.

Puisqu'une onde carrée contient des fréquences harmoniques élevées, c'est un signal idéal pour le test des filtres audio. Un filtre passe-bas, qui ne laisse passer que les fréquences les plus basses, devrait supprimer le sifflement en arrondissant les angles du signal carré.

Déformations sonores

Peut-être vous demandez-vous si le LM386, qui est un amplificateur audio, est capable d'amplifier la musique ? Oui, c'est en fait ce à quoi il est destiné. Vérifiez-le avec tout appareil audio muni d'une sortie pour des écouteurs.

Rappelez-vous que le LM386 n'est qu'un amplificateur monophonique ; vous ne pourrez donc pas entendre les deux canaux sonores de votre reproducteur de musique. Pour n'en entendre qu'un, utilisez un câble miniature muni d'une prise jack à chaque extrémité. Coupez une de ces prises, n'importe laquelle, et jetez-la, puis dénudez le câble, vous devriez apercevoir une tresse de cuivre servant de blindage et que vous devez relier à la masse. Le blindage de cuivre entoure deux conducteurs isolés qui distribuent les signaux des deux canaux sonores. Coupez l'un d'entre eux (peu importe lequel) et jetez le surplus, mais ne laissez pas la partie restante en contact avec le blindage.

Dénudez l'autre conducteur. Les fils qui le composent sont très fins et il vous sera plus facile de les manipuler en les reliant entre eux par un peu de soudure (figure 5-52).

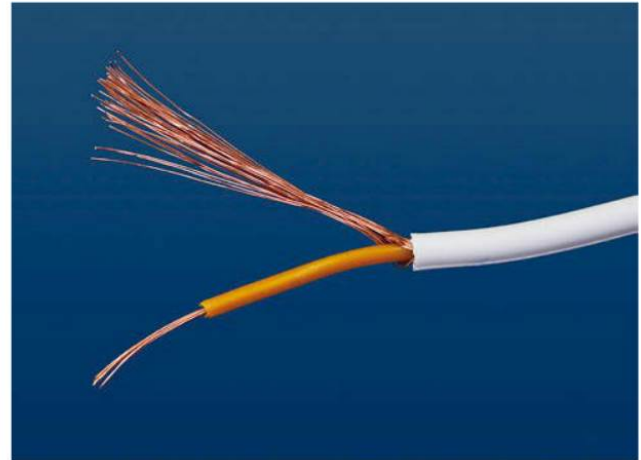


Figure 5-52. Câble audio dénudé afin d'accéder au blindage et à l'un des conducteurs. Le blindage est relié à la masse.

Assurez-vous d'avoir déconnecté l'alimentation de votre circuit, puis basculez tous les interrupteurs vers le bas. Retirez le fil orange qui relie la broche 3 du temporisateur 555 au condensateur de 220 μF situé dessous. Cela déconnecte le temporisateur 555 du circuit d'amplification et le condensateur C5 devient l'entrée de votre circuit.

Utilisez un des cordons de test muni de pinces crocodiles pour relier le fil du côté positif du condensateur, puis reliez son autre extrémité au conducteur central du câble audio. Utilisez un autre fil de test pour relier le blindage du câble à la masse de votre circuit.

Alimentez le circuit et mettez en marche votre appareil musical. Vous devriez alors entendre la musique. Si le son est trop puissant et distordu, essayez d'insérer une résistance de 1K ou 10K entre le conducteur audio du câble et le condensateur C6.

Quand vous aurez obtenu un volume correct, essayez les filtres passe-bas et passe-haut pour constater leurs effets. Ils ne vont pas vous permettre d'obtenir un son correct, mais ils vont le modifier.

Historique : les filtres passifs

Dans les systèmes audio usuels, chaque enceinte acoustique contient deux reproducteurs sonores : l'un est un petit haut-parleur reproduisant les sons aigus, appelé *tweeter*, l'autre est un haut-parleur assez gros, appelé *woofer*, conçu pour la reproduction des fréquences basses. Dans les systèmes les plus récents le woofer de chaque enceinte est retiré et déporté dans une enceinte séparée qui peut se poser à n'importe quel endroit, car

l'oreille humaine ne distingue pas précisément l'endroit d'où proviennent les sons graves. Dans ces systèmes, le woofer est appelé subwoofer, car il peut reproduire des fréquences très basses.

Les fréquences audibles sont réparties entre le tweeter et le woofer par un filtre, afin que le tweeter ne soit pas perturbé par les fréquences basses et que le woofer soit isolé des fréquences hautes. Le circuit qui permet ce filtrage est un « filtre passif » (*crossover filter* en anglais). Les puristes audiophiles les réalisent eux-mêmes (en particulier pour la sonorisation de leurs voitures) pour qu'ils soient adaptés aux haut-parleurs qu'ils ont choisis et à leurs enceintes acoustiques qu'ils conçoivent également eux-mêmes.

Si vous souhaitez réaliser un filtre passif, vous devrez vous procurer des condensateurs au polyester (figure 5-53) de grande qualité ; ils ne sont pas polarisés, ont une durée de vie très supérieure et sont fabriqués plus soigneusement. Il vous faut également une bobine (figure 5-54) de taille correcte et comportant le bon nombre de spires, afin de couper les fréquences de façon appropriée.

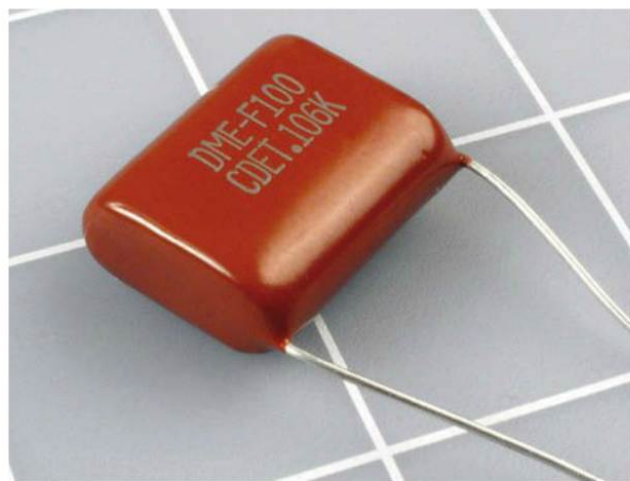


Figure 5-53. Les condensateurs non électrochimiques comme ce condensateur polyester de grande qualité, ne sont pas polarisés.

La figure 5-54 présente une bobine audio que j'ai trouvée sur eBay pour quelques euros. J'étais curieux de voir comment elle était réalisée, alors je l'ai démontée.



Figure 5-54. Quel est cet étrange composant que l'on peut trouver dans un système audio de gamme supérieure ?

J'ai commencé par retirer le ruban vinyle qui l'entourait et j'ai trouvé une bobine de fil émaillé, un fil de cuivre fin recouvert d'un vernis isolant comme celui de la figure 5-55. J'ai déroulé le fil (figure 5-56) en comptant le nombre de spires.

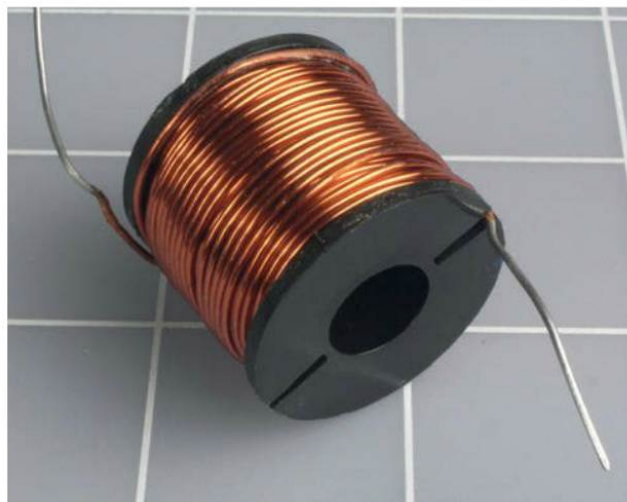


Figure 5-55. Après avoir retiré le ruban de vinyle noir, la bobine apparaît.



Figure 5-56. La bobine en plastique et le fil émaillé.

Voici les spécifications de cette bobine utilisée dans un filtre audio passif : un fil de cuivre émaillé de 12 m de long, de diamètre 0,82 mm (jauge AWG 20), constitue une bobine de 200 spires enroulées sur un support en plastique.

En conclusion, les composants audio font l'objet d'une vénération excessive et ils sont souvent vendus très cher, alors que vous pouvez les réaliser vous-même, à partir des caractéristiques précédemment énoncées, en les ajustant selon vos besoins.

Supposons que vous vouliez installer des haut-parleurs de basse dans votre véhicule. Pourriez-vous fabriquer votre propre filtre, afin qu'il ne reproduise que les fréquences basses ? Absolument : il vous suffira d'ajouter des spires jusqu'à ce que votre bobine coupe les fréquences hautes, comme vous le souhaitez. Prenez simplement la précaution d'utiliser un fil suffisamment gros pour qu'il ne surchauffe pas, si vous diffusez une puissance de 100 W ou plus.

Un autre projet possible : un orgue lumineux que vous pourriez relier à la sortie de votre chaîne stéréophonique et qui utiliserait des filtres pour séparer les sons en trois canaux, chacun commandant l'allumage de LED de couleur. Les LED rouges répondraient aux fréquences basses, les jaunes aux fréquences intermédiaires et les vertes aux fréquences élevées (ou toutes autres couleurs). Vous pouvez insérer des diodes en série avec les LED, pour rectifier le courant alternatif, et des résistances pour limiter la tension aux bornes des LED autour de 2,5 V, lorsque la puissance sonore est au maximum. Utilisez votre multimètre pour mesurer l'intensité qui traverse chaque résistance et multipliez-la par la chute de tension à ses bornes. Ainsi vous déterminez la puissance qu'elles doivent dissiper, et vous pouvez choisir les résistances adaptées.

Le domaine de l'audio offre une immense variété de possibilités, si vous décidez de réaliser vos propres dispositifs.

Expérience 30 : autour de la distorsion

Modifions à nouveau le circuit de l'expérience 29, cette fois afin de démontrer un autre effet audio fondamental : la distorsion.

De quoi avez-vous besoin ?

- Le circuit réalisé sur la plaque de montage de l'expérience 20
- 1 transistor 2N2222
- 1 résistance de 330 Ω et 1 de 10K
- 2 condensateurs de 1 μ F et 1 de 10 μ F

Modifications à apporter

Les modifications du circuit ne sont pas nombreuses. Vous devez ajouter 1 transistor, 2 résistances et 3 condensateurs (figure 5-57).

La figure 5-58 montre les mêmes composants avec leurs valeurs dans la partie concernée du schéma, les autres composants étant omis.

Le transistor 2N2222 surcharge l'entrée du LM386 et les condensateurs C8 et C9 de 1 μ F limitent la diffusion des fréquences élevées, afin d'augmenter l'effet sonore.

Le condensateur C10 augmente le gain du LM386. C'est une caractéristique de ce circuit intégré : si l'on ajoute un condensateur entre sa broche 1 et sa broche 8, son gain passe de 20 à 200.

Ce pauvre petit amplificateur est donc contraint, de deux façons différentes, à faire plus qu'il n'est prévu par ses concepteurs. Il va bien entendu réagir en conséquence !

Une fois les modifications apportées, alimentez le circuit. La sortie précédente émettait un bruit sifflant car une onde carrée était diffusée. En modifiant les réglages des potentiomètres de 10K et de 1M, vous allez produire un son strident, dans le style de Jimmy Hendrix !

Si le résultat est trop mauvais, retirez la résistance de 330 Ω et remplacez-la par une de valeur un peu plus élevée.

Que se passe-t-il exactement ?

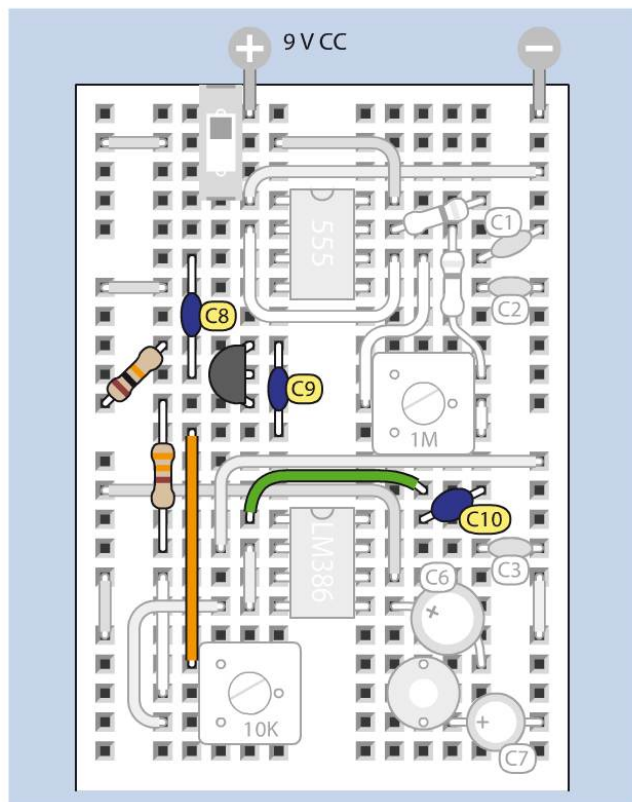


Figure 5-57. Modifications du circuit de l'expérience 29 produisant des distorsions.

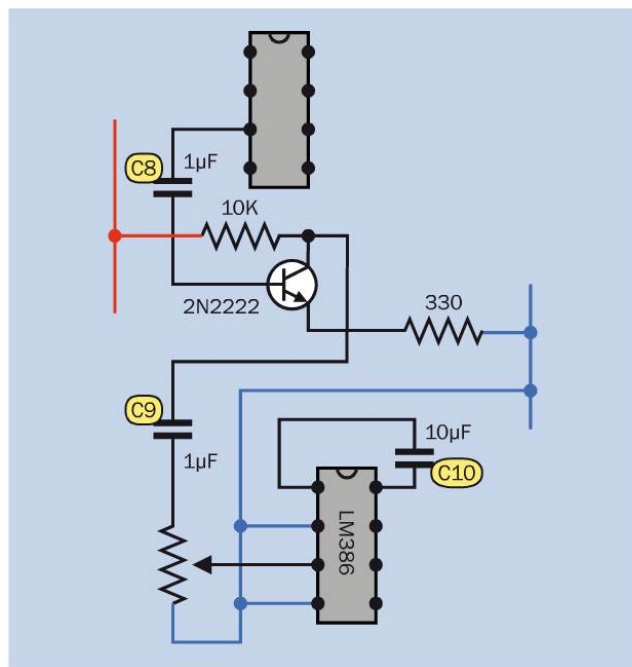


Figure 5-58. Les composants ajoutés au schéma et leurs valeurs.

Historique : l'écrêtage (clipping)

Aux débuts de la hi-fi, les ingénieurs cherchaient à parfaire les procédés de reproduction sonore. Ils souhaitent que la forme d'onde à la sortie de l'amplificateur soit la même que celle de l'entrée, mais plus grande et donc suffisamment puissante pour piloter les enceintes. Même une très légère distorsion de la forme d'onde n'était pas acceptable.

Peu d'ingénieurs réalisaient que leurs amplificateurs à tube magnifiquement conçus allaient être mis à mal par une nouvelle génération de guitaristes de rock dont l'intention était de créer la plus grande distorsion possible.

Si vous forcez un tube électronique ou un transistor à amplifier un signal sinusoïdal au-delà de ses possibilités, il manque de puissance et « écrête » le haut et le bas de la courbe du signal. Celui-ci ressemble alors à un signal carré, dont la sonorité est dure et stridente. Pour les guitaristes de rock qui essaient de créer une sonorité à part, cette âpreté produit l'effet désiré.

La séquence de la figure 5-59 montre ce qui se passe. Aussi longtemps que la tension de sortie reste dans les limites de l'amplificateur, le signal est reproduit fidèlement. Cependant, sur la seconde image, l'entrée de l'amplificateur a été augmentée à un point tel que sa sortie devrait être en dehors de ses limites (représentées par les parties grisées de la courbe). L'amplificateur ne pouvant pas générer une telle puissance, il écrête le signal comme le montre la troisième image.

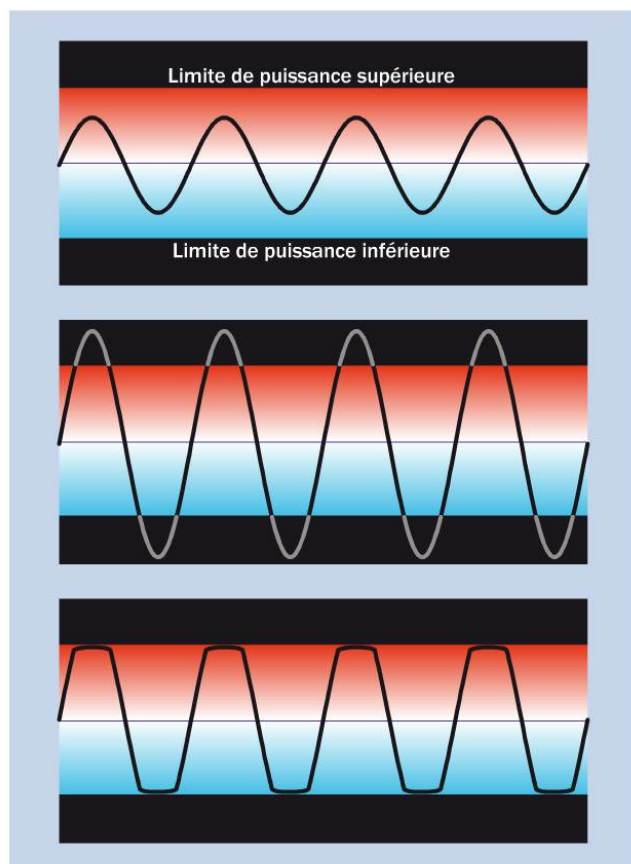


Figure 5-59. Quand une onde sinusoïdale (en haut) est appliquée à l'entrée d'un amplificateur fonctionnant en dehors de ses limites, il tronque le signal (en bas).

L'écrêtage semblait intéressant pour les guitaristes de rock et des « pédales d'effet » ont été créées pour générer cette distorsion (figure 5-60).



Figure 5-60. Cette pédale d'effet Vox Wow-Fuzz a été l'une des premières à créer ce type de distorsion que les ingénieurs avaient essayé d'éliminer durant des décennies.

Historique : origines de la pédale d'effet

Le premier titre à utiliser une boîte à distorsion fut *The 2 000 Pound Bee*, enregistré par les Ventures en 1962. C'est de loin le morceau instrumental le plus affreux jamais enregistré ; il utilisait cet effet comme un gadget et il a sans doute dissuadé beaucoup de musiciens de prendre ce concept au sérieux.

Ray Davies, du groupe The Kinks, fut le premier à réellement expérimenter la distorsion. Initialement, il relia la sortie d'un amplificateur à l'entrée d'un autre, lors de l'enregistrement de son tube *You Really Got Me*, ce qui surchargea l'entrée et créa l'écrêtage, principe de base de la distorsion. Puis ce fut au tour de Keith Richards d'utiliser une pédale Gibson Maestro lorsque les Rolling Stones enregistrèrent (*I Can't Get No*) *Satisfaction*, en 1965.

Aujourd'hui, il existe des milliers de défenseurs de la distorsion « idéale ». La figure 5-61 montre un schéma de Flavio Dellepiane, concepteur italien de circuits, qui présente son travail sur son site <http://www.redcircuits.com>. Autodidacte, Dellepiane s'est formé grâce à la lecture de magazines d'électronique, comme *Wireless World*. Dans ce circuit, il utilise un amplificateur à gain très élevé, composé de trois transistors à effet de champ, qui reproduisent quasiment l'onde carrée arrondie typique d'un amplificateur à tube surchargé.

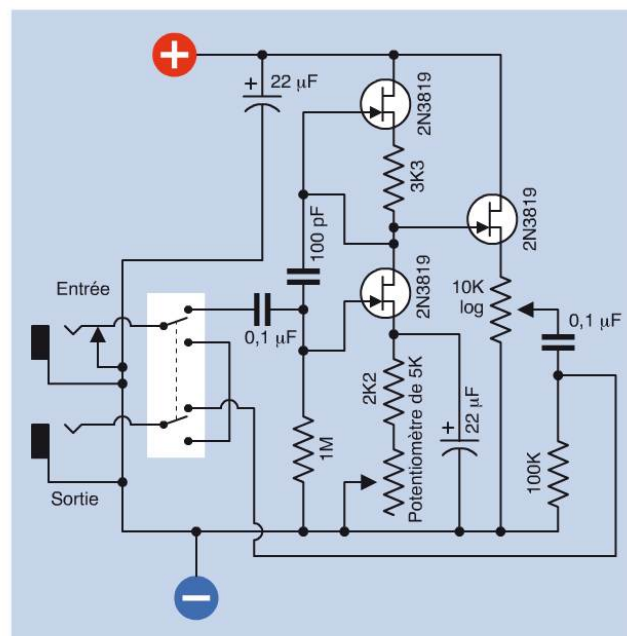


Figure 5-61. Ce circuit, conçu par Flavio Dellepiane, emploie trois transistors pour simuler le type de distorsion créée lorsqu'on surcharge l'entrée d'un amplificateur à tubes électroniques.

Dellepiane propose des dizaines de schémas sur son site, développés et testés avec un oscilloscope à double trace, un oscillateur sinusoïdal à faible distorsion, un distorsiomètre et un voltmètre audio de précision. Ce dernier appareil et l'oscillateur, dont il donne les plans, ont d'ailleurs été conçus par Dellepiane lui-même. Son site constitue un lieu incontournable pour les passionnés d'électronique.

Avant la distorsion, il y avait le trémolo, que beaucoup confondent avec le vibrato. Alors, clarifions ce point :

Le vibrato appliqué à une note fait osciller sa fréquence de haut en bas, comme quand un guitariste effectue un *bend* (pincement) sur une corde.

Le trémolo appliqué à une note entraîne une fluctuation du volume, comme si quelqu'un tournait le bouton du volume d'une guitare dans un sens et dans l'autre très rapidement.

Harry DeArmond commercialisa la première pédale d'effet trémolo, qu'il appela Trem-Trol. Elle ressemblait aux anciennes radios portables, avec deux boutons sur le devant et une poignée sur le dessus. Peut-être afin de réduire les coûts, DeArmond n'utilisa aucun composant électronique. La pédale se composait d'un moteur et de son arbre de forme tronconique sur lequel s'appuyait une roue en caoutchouc. La vitesse de la roue variait lorsqu'on tournait un bouton pour la repositionner de haut en bas de l'arbre. La roue, à son tour, actionnait une petite capsule d'une solution électrolytique (appelée « hydro-fluide » par DeArmond), dans laquelle deux fils étaient immergés, véhiculant le signal audio. Tandis que la capsule se déplaçait d'avant en arrière, le liquide se répandait d'un côté à l'autre, faisant varier la résistance entre les électrodes. La sortie audio s'en trouvait modulée.

Les pédales Trem-Trol sont désormais des objets de collection. L'ingénieur Dan Formosa en montre quelques exemples sur son site : <http://danformosa.com/dearmond>. Johann Burkard, quant à lui, a publié sur Internet un fichier MP3 émanant de sa pédale Trem-Trol que vous pouvez entendre sur le site <http://johannburkard.de/blog/music/effects/DeArmond-Tremolo-Control-clip.html>.

Le concept d'une source mécanique associée à des appareils électroniques de déformation du son ne s'est pas arrêté là. Le son unique des premiers orgues Hammond provenait ainsi d'un ensemble de roues dentées entraînées par un moteur. Chaque roue créait une inductance variable dans un capteur ressemblant à la tête d'enregistrement d'un lecteur de cassettes.

Mais revenons au trémolo : imaginez un disque transparent recouvert de peinture noire, à l'exception d'une bande circulaire aux deux extrémités effilées (figure 5-62). Pendant que le disque tourne, si vous allumez une LED puissante derrière la bande transparente et que vous placez un phototransistor devant, vous aurez le principe d'une pédale trémolo. Vous pourriez même créer des effets inédits en variant les motifs de la bande circulaire du disque (figure 5-63).

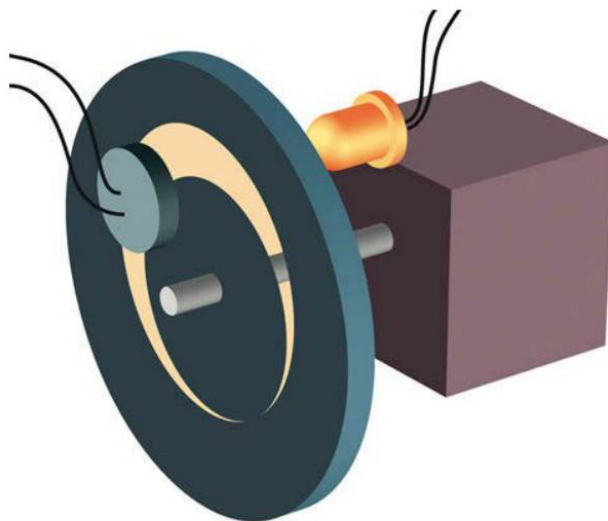


Figure 5-62. Un générateur de trémolo imaginaire.

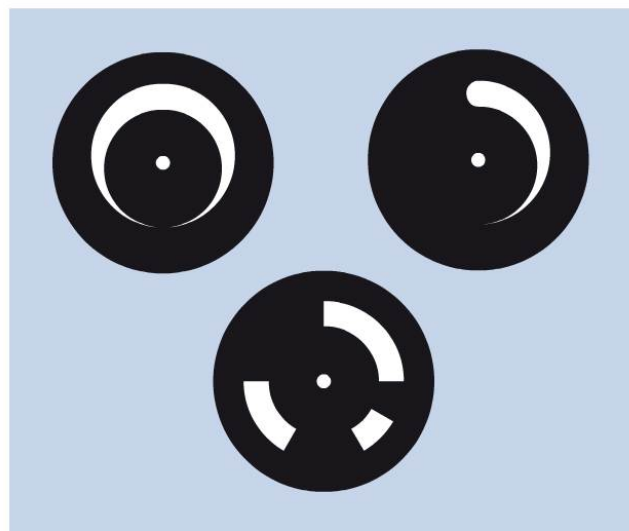


Figure 5-63. Disques avec des bandes de différentes formes, qui permettraient de créer des effets trémolo variés.

Aujourd'hui, les guitaristes disposent de tout un assortiment d'effets, qui peuvent être reproduits à partir de plans trouvés sur Internet. Je vous conseille également les deux ouvrages suivants (en anglais) :

Analog Man's Guide to Vintage Effects, de Tom Hughes (For Musicians Only Publishing, 2004). C'est un excellent guide de toutes les pédales d'effet vintage que l'on peut imaginer.

How to Modify Effect Pedals for Guitar and Bass, de Brian Wampler (Custom Books Publishing, 2007). Guide extrêmement détaillé pour les débutants. Disponible uniquement en téléchargement sur des sites tels que <http://www.openlibrary.org> ou d'occasion chez des revendeurs spécialisés.

Bien entendu, vous pouvez toujours dépenser quelques centaines d'euros pour acheter une pédale d'effet qui utilise un procédé numérique pour reproduire de multiples effets de distorsion, (métal, fuzz, chorus, phaser, flanger, trémolo, délai, réverbération et bien d'autres) en un seul appareil. Naturellement, les puristes affirmeront que le son n'est pas le même, mais peut-être que le problème est ailleurs. Certains demeureront juste insatisfaits tant qu'ils n'auront pas créé leur propre pédale, qui produira un son bien à eux.

Expérience 31 : une radio sans soudure ni alimentation

Pour revenir au concept d'inductance, je veux vous montrer comment elle permet à un circuit très simple de recevoir des stations de radiodiffusion en modulation d'amplitude, sans même nécessiter une alimentation. On appelle ce type d'appareil un récepteur radio à diode cristal, car les premiers exemplaires utilisaient un minéral de plomb cristallisé (la galène), qui se comportait comme un semi-conducteur. Le concept fut élaboré à la naissance des télécommunications, mais si vous ne l'avez jamais réalisée, vous êtes passé à côté d'une expérience vraiment magique.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 objet cylindrique rigide, d'environ 7,5 cm de diamètre, tel qu'une boîte de comprimés
- 18 m de fil électrique de jauge AWG 22 (0,6 mm de diamètre environ)

- 15 à 30 m de fil électrique souple d'1,3 mm de diamètre environ. Ce peut être du fil torsadé de diamètre inférieur pour en réduire le coût, mais votre récepteur pourrait ne pas capter autant de stations.
- 1 corde en polypropylène ou en nylon, longue de 3 m
- 1 diode au germanium
- 1 écouteur à haute impédance
- 1 fil de test
- 3 pinces crocodiles ou d'autres fils de test

En option :

- 1 alimentation de 9 V CC (pile ou adaptateur secteur)
- 1 circuit intégré amplificateur LM386
- 1 petit haut-parleur (un diamètre de 5 cm conviendra)

Première étape : l'inductance

Vous devez commencer par réaliser un bobinage qui va résonner selon les fréquences de transmission des stations radiophoniques en modulation d'amplitude. La bobine sera constituée de 65 spires de fil de jauge AWG 22, soit une longueur approximative de 18 m.

Vous pouvez bobiner le fil autour d'une bouteille ou d'une boîte cylindrique dont le diamètre est constant, proche de 7,5 cm. Une bouteille d'eau fera l'affaire, si elle n'est pas faite avec du plastique trop fin qui pourrait se briser ou se déformer sous la pression.

Après avoir préparé une bouteille propre et rigide, utilisez un poinçon ou un clou pour percer deux paires de trous (figure 5-64), qui serviront à maintenir les extrémités du bobinage.

Dénudez une des extrémités de votre fil de câblage et glissez-la dans les trous de la bouteille (figure 5-65). Puis enroulez cinq spires de fil autour de la bouteille et fixez-les avec une petite longueur de ruban adhésif d'électricien ou de scotch normal.



Figure 5-64. Les trous vont servir à maintenir le fil enroulé autour de la bouteille.

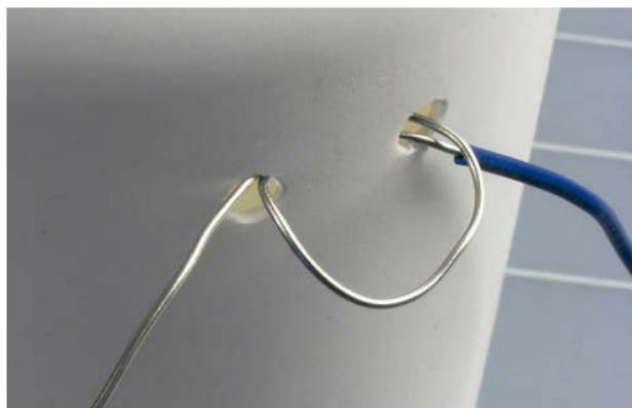


Figure 5-65. Maintenez une extrémité de votre fil en le faisant passer dans les trous.

Vous devez maintenant retirer l'isolant de votre fil sur environ 13 mm. Le but est de vous permettre de réaliser une liaison électrique à ce point. Utilisez votre pince à dénuder pour sectionner l'isolant plastique au point souhaité, puis faites glisser l'isolant pour dégager le point de connexion (figure 5-66).



Figure 5-66. Utilisez votre pince à dénuder et vos doigts pour libérer environ 13 mm d'isolant.

Dans l'étape suivante, vous allez torsader la partie dénudée du fil pour former une boucle qui sera plus accessible et empêchera l'isolant de se rétracter (figure 5-67).



Figure 5-67. Faites une boucle avec la partie dénudée du fil.

Vous venez de créer une *prise intermédiaire* sur votre inductance. Retirez le ruban adhésif que vous avez utilisé pour maintenir temporairement les cinq premières spires, puis bobinez à nouveau cinq autres spires autour de la bouteille. Utilisez à nouveau du ruban adhésif pour maintenir l'enroulement et créez un second point intermédiaire. Vous devrez en créer ainsi un total de 12. Ils n'ont pas besoin d'être parfaitement alignés. Quand vous aurez terminé le dernier point intermédiaire, bobinez cinq spires supplémentaires autour du flacon et coupez le fil. Formez un U d'environ 13 mm de diamètre afin de pouvoir le fixer dans les trous que vous avez percés à l'autre extrémité de la bouteille. Glissez le fil dans les trous et faites une boucle pour renforcer sa fixation. La figure 5-68 montre la bobine que j'ai réalisée autour d'un flacon de vitamines.

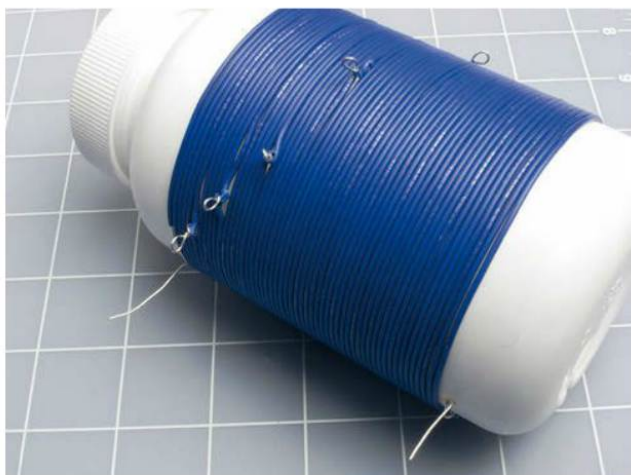


Figure 5-68. L'inductance terminée, fermement maintenue autour du flacon.

L'étape suivante consiste à installer une antenne qui sera réalisée avec un fil le plus long possible et avec un diamètre important. Ce sera facile si vous habitez une maison avec un jardin. Ouvrez une fenêtre et jetez une bobine de fil électrique de jauge AWG 16 (diamètre 1,3 mm) en retenant l'extrémité libre du fil, puis à l'extérieur, déroulez la bobine de fil que vous attachez ensuite à un arbre, une gouttière ou un poteau, à l'aide d'une corde en polypropylène ou en nylon. La longueur totale du fil doit être entre 15 et 30 m. À l'endroit où le fil sort par la fenêtre, attachez-le à une autre corde. L'antenne doit être le plus loin possible du sol ou de toute masse reliée à la terre.

Si vous n'avez pas de terrain accessible, tendez le fil de votre antenne en le fixant par des morceaux de corde aux cadres des fenêtres, aux poignées des portes, ou à tout autre point d'attache qui l'éloigne le plus possible du sol. Il n'est pas indispensable que l'antenne soit dressée en ligne droite, vous pouvez la suspendre tout autour d'une pièce.



Attention : haute tension !

Le monde qui nous entoure est rempli d'électricité. On ne s'en rend généralement pas compte, mais un orage soudain nous rappelle qu'il existe un potentiel électrique énorme entre le sol et les nuages.

Si vous avez installé une antenne extérieure, ne vous en servez jamais par temps d'orage, car il est possible qu'un éclair la foudroie. Ce peut être extrêmement dangereux. Déconnectez l'extrémité intérieure de votre antenne et laissez-la à l'extérieur en la reliant à la terre pour plus de sécurité.

Antenne et terre

Utilisez une pince crocodile pour relier votre antenne à l'extrémité en haut de l'inductance que vous avez réalisée.

Vous devez ensuite établir une connexion à la terre. Cela revient littéralement à la relier au sol extérieur. L'idéal serait d'enterrer une tige métallique d'environ 60 cm dans le sol humide. Si vous utilisez un piquet de terre (vendu par les fournisseurs de matériel électrique), soyez prudent en l'enfonçant dans le sol, pour ne pas percer une conduite cachée.

Un tuyau d'eau est souvent suggéré pour réaliser une prise de terre ; c'est une bonne idée, à condition qu'il soit métallique ! Même si votre installation est faite en tubes de cuivre, une partie pourrait avoir été réparée à l'aide de tubes de plastique.

La meilleure alternative serait de relier un fil à la connexion de terre d'une prise électrique, mais il vaut mieux éviter cette solution à cause du risque élevé de toucher accidentellement les autres connexions.

Il vous faut maintenant deux composants assez difficiles à trouver :

- une diode au germanium, qui fonctionne comme une diode au silicium, mais qui est recommandée pour les très faibles tensions et intensités ;
- un écouteur à haute impédance. Les écouteurs que vous utilisez avec votre baladeur MP3 ne conviendront pas. Il faut que vous trouviez un ancien écouteur, comme celui de la figure 5-69. Si son câble de liaison est équipé d'un connecteur, vous devrez le retirer et dénuder soigneusement l'extrémité du câble.



Figure 5-69. Vous avez besoin de ce type d'écouteur pour votre récepteur radio non alimenté.

Assemblez les composants à l'aide de fils de test et de pinces crocodiles (figure 5-70). La version que j'ai réalisée n'est pas aussi belle que mon dessin, mais les connexions sont identiques (figure 5-71). Remarquez que le fil de test, en bas du dessin, peut être relié à n'importe quel point intermédiaire de la bobine. C'est de cette façon que vous allez accorder votre récepteur radio.

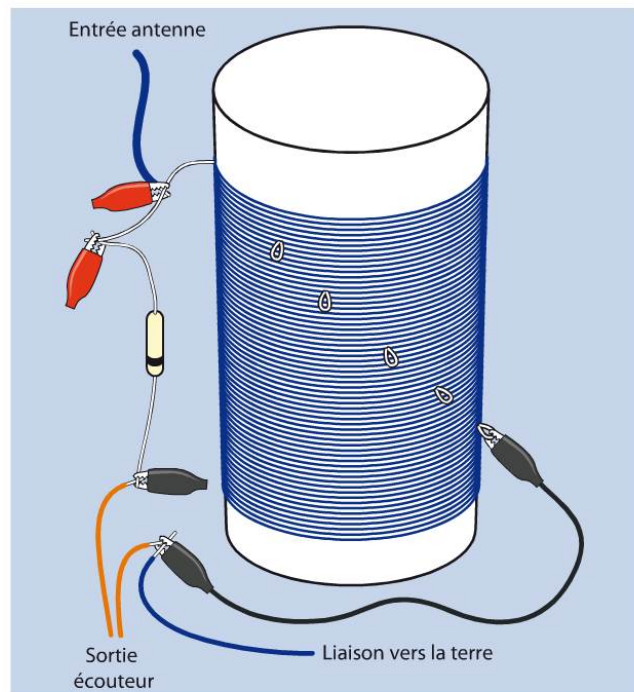


Figure 5-70. Plan d'assemblage des composants.



Figure 5-71. Réalisation de mon récepteur radio.

Si vous avez pu suivre ces instructions et si vous habitez à 30 ou 40 km d'un émetteur radiophonique émettant en modulation d'amplitude (petites ondes), vous entendrez faiblement le son émis par les stations de radio – alors même qu'aucune énergie n'est fournie au circuit que vous avez réalisé. Ce projet est vieux de plusieurs décennies, mais le résultat est toujours source d'étonnement et de magie (figure 5-72).

Vous pourriez ne rien entendre dans les situations suivantes : si vous habitez trop loin d'une station d'émission, si vous ne pouvez pas installer une antenne suffisamment longue, ou encore si votre prise de terre n'est pas de qualité suffisante. N'abandonnez pas pour autant ; attendez la soirée. La réception des fréquences réservées aux stations émettant en modulation d'amplitude change totalement quand le soleil n'éclaire plus l'atmosphère.

Pour choisir parmi plusieurs stations, déplacez la pince crocodile du fil de test d'une prise du bobinage à l'autre. Selon l'endroit où vous habitez, vous pouvez recevoir une seule station ou plusieurs une par une ou simultanément.



Figure 5-72. La joie de capter un signal radio à l'aide de composants ultrasimples et sans alimentation.

Vous pensez obtenir quelque chose à partir de rien, mais en fait, vous utilisez l'énergie de l'émetteur de la station de radiodiffusion. Un émetteur diffuse un signal modulé puissant, de fréquence fixe, par l'intermédiaire d'une tour de diffusion. Quand l'ensemble inductance-antenne résonne sur la fréquence émise, vous absorbez suffisamment de tension et de courant pour exciter l'écouteur à haute impédance.

C'est parce que le courant doit circuler dans votre inductance, puis s'écouler quelque part, que vous avez dû établir une bonne connexion avec la terre. Vous pouvez comparer la terre à un réservoir infini de puissance, mais de tension nulle. L'émetteur d'une station de radiodiffusion est également relié à la terre (figure 5-73).

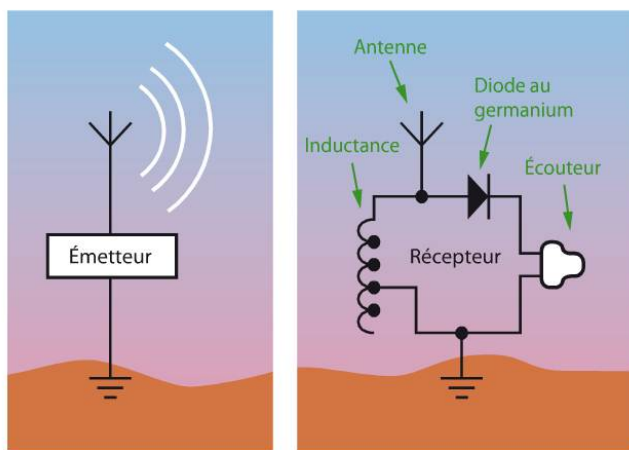


Figure 5-73. Dépourvu d'alimentation, votre récepteur prélève suffisamment d'énergie en provenance d'un émetteur distant pour créer un signal audible dans l'écouteur.

Améliorations

Si vous avez des difficultés à entendre quoi que ce soit dans l'écouteur, essayez de le remplacer par un transducteur piézoélectrique, connu sous le nom de buzzer piézoélectrique. Il vous faut le modèle qui ne comporte pas de circuit interne générateur de bruit et qui fonctionne de manière passive, à la manière d'un haut-parleur. Appliquez-le près de votre oreille ; vous devriez constater qu'il fonctionne aussi bien, voire mieux qu'un écouteur.

Vous pouvez également amplifier le signal. L'idéal serait d'utiliser un amplificateur opérationnel comme premier étage, car il possède une impédance d'entrée très élevée (voir l'ouvrage *L'électronique en pratique 2*). Ici, contentez-vous d'injecter le signal directement dans l'amplificateur LM386 de l'expérience 29.

La figure 5-74 représente le circuit très simple correspondant. La diode au germanium peut être reliée directement à l'entrée du LM386, car je ne pense pas qu'un contrôle de volume soit nécessaire. Faites bien attention de connecter un condensateur de 10 μF entre les broches 1 et 8, afin d'augmenter au maximum le gain du circuit intégré. Même à l'endroit où je vis, à 180 km de Phoenix (Arizona), j'ai pu capter une station émettant depuis cette ville.

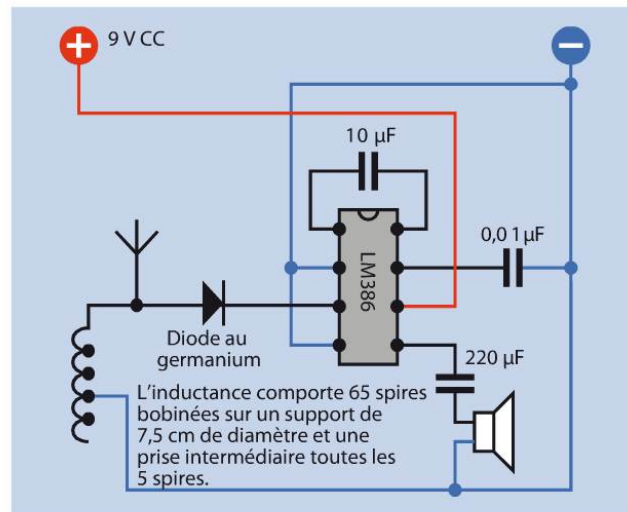


Figure 5-74. Le circuit intégré amplificateur LM386 permet d'entendre des stations de radiodiffusion par un haut-parleur.

Si vous souhaitez améliorer la sélectivité de votre récepteur, ajoutez un condensateur variable, afin d'accorder avec précision la fréquence de résonance de votre circuit. Les condensateurs variables deviennent rares de nos jours, mais vous en trouverez par exemple chez les fournisseurs Radiospares ou Gotronic.

Aux États-Unis, le catalogue de Scitoys comprend ces éléments. C'est un fournisseur tenu par Simon Quellan Field, dont le site Internet propose de nombreux projets amusants, que vous pouvez réaliser personnellement. Une de ses idées astucieuses consiste à remplacer la diode au germanium par une LED à faible consommation, en série avec une pile de 1,5 V. Dans mon cas, ce circuit n'a pas fonctionné, car je vis dans une banlieue éloignée, mais si vous habitez près d'un émetteur, vous devriez pouvoir constater les fluctuations lumineuses de la LED au rythme de la modulation de l'émission.

Théorie : fonctionnement d'un récepteur radio

Les radiations électromagnétiques de hautes fréquences peuvent parcourir des milliers de kilomètres. Pour réaliser un émetteur radio, on peut utiliser un temporisateur 555 fonctionnant par exemple à la fréquence de 850 kHz (c'est-à-dire 850 000 cycles par seconde) et dont le signal de sortie serait envoyé à l'entrée d'un amplificateur de puissance relié à une tour de transmission, ou plus simplement, à un fil de grande longueur. S'il vous était possible de bloquer toute l'activité électromagnétique dans l'atmosphère, vous pourriez détecter mon signal et l'amplifier.

C'est à peu près ce que fit Guglielmo Marconi (figure 5-75) durant son expérience révolutionnaire, en 1901, mais pour créer les oscillations, il utilisait un simple éclateur générant une étincelle, au lieu d'un temporisateur 555. Ces transmissions étaient limitées, car elles n'avaient que deux états : émission ou silence. Seule la transmission de messages en code Morse était possible.



Figure 5-75. Guglielmo Marconi, grand pionnier de la radio (source : Wikimedia Commons).

Cinq années plus tard, le premier signal audio était transmis, en superposant des fréquences audibles à la haute fréquence de l'onde porteuse, faisant ainsi varier la porteuse selon les fluctuations du signal audio (figure 5-76).

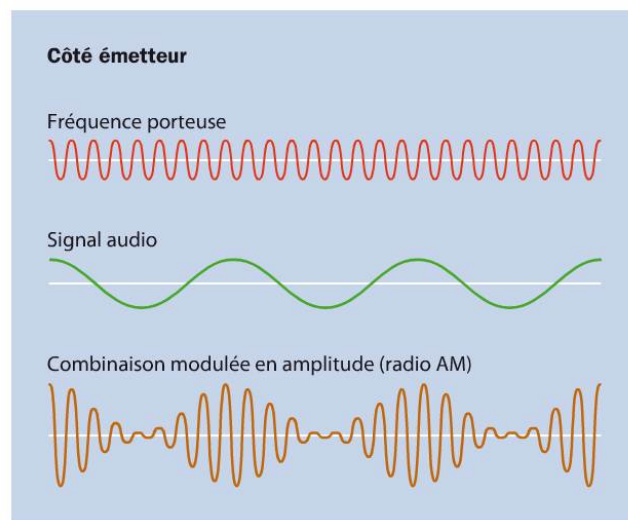


Figure 5-76. Utilisation d'une onde porteuse de fréquence fixe pour la transmission d'un signal audible.

À la station réceptrice, la simple association d'une bobine et d'un condensateur permettait de détecter la fréquence porteuse parmi toutes les autres radiations électromagnétiques. Les valeurs du condensateur et de l'inductance étaient déterminées afin que leur circuit résonne à la même fréquence que celle de l'onde porteuse. Ce circuit de base est représenté sur le schéma de la figure 5-77, où le condensateur variable est représenté par le symbole d'un condensateur muni d'une flèche.

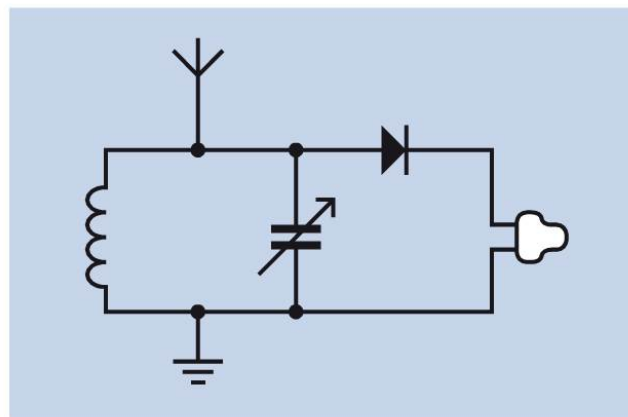


Figure 5-77. L'ajout d'un condensateur variable au circuit précédent permet une meilleure discrimination des différents signaux du spectre électromagnétique.

L'onde porteuse fluctue si rapidement qu'un écouteur ne peut pas suivre ses variations positives et négatives. Il hésitera entre la tension haute et la tension basse du signal, ne reproduisant aucun son. En bloquant la moitié du signal pour n'en conserver que les impulsions positives de la tension, une diode résout le problème. Bien que ces variations demeurent très rapides, elles déplacent la membrane de l'écouteur au même rythme, en un mouvement correspondant à la tension moyenne, reproduisant ainsi l'onde sonore d'origine (figure 5-78).

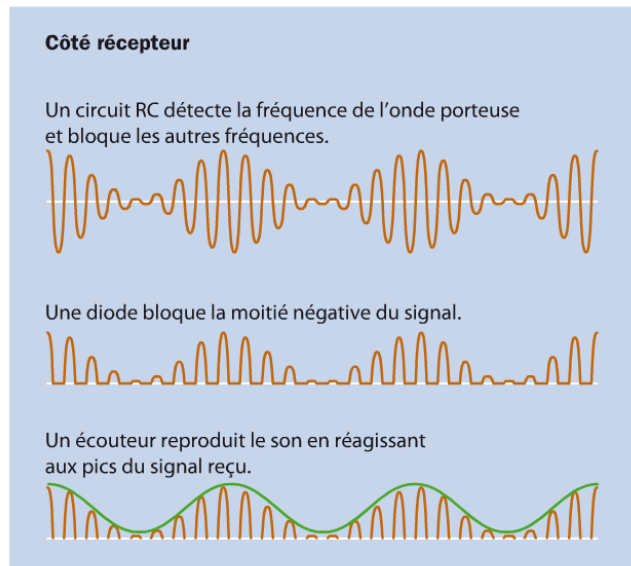


Figure 5-78. Décodage d'une émission en modulation d'amplitude, reproduite par l'écouteur d'un récepteur simple.

Quand un condensateur est ajouté à un circuit de réception, le signal transmis est d'abord bloqué par l'auto-inductance de la bobine, alors qu'il charge le condensateur. Si une impulsion négative identique est reçue après une durée dépendant de la valeur de la bobine et de celle du condensateur, elle coïncide avec la décharge du condensateur et l'absorption de la bobine. De cette façon, la fréquence de l'onde porteuse provoque la résonance du circuit. Les fluctuations du signal engendrées par les variations sonores sont transformées en fluctuations de la tension aux bornes du circuit.

Quant aux autres fréquences captées par l'antenne : les plus faibles sont dérivées à la terre par la bobine, les plus élevées l'étant par le condensateur. Elles sont toutes rejetées.

Les fréquences allouées aux stations de radiodiffusion en modulation d'amplitude (AM) s'étendent de 300 kHz à 1 MHz pour leur onde porteuse. De nombreuses autres

fréquences sont utilisées pour des besoins variés, par exemple les transmissions des radioamateurs. Il est facile d'obtenir une licence de radioamateur, et, en disposant des moyens appropriés et d'une antenne bien dégagée, il est possible de communiquer avec d'autres amateurs, partout dans le monde – sans dépendre d'aucun réseau de communication.

Expérience 32 : quand le matériel rencontre le logiciel

De nombreux lecteurs de ce livre ont entendu parler d'Arduino. Cette expérience et les deux suivantes vont vous montrer comment mettre en œuvre un microcontrôleur Arduino et écrire des programmes, au lieu de vous limiter au téléchargement d'applications sur Internet.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 carte Arduino Uno ou un clone compatible
- 1 câble USB munis d'un connecteur de type A et d'un autre de type B
- 1 ordinateur de bureau ou portable avec un port USB disponible.
- 1 LED générique

Définitions

Un microcontrôleur est un circuit intégré qui fonctionne comme un petit ordinateur. On doit écrire un programme contenant des instructions que le microcontrôleur peut comprendre et on les place dans la mémoire du circuit intégré. Cette mémoire est non-volatile, ce qui signifie que son contenu est préservé, même si l'alimentation est supprimée.

Normalement, je devrais vous suggérer d'écrire immédiatement un programme, mais apprendre à utiliser un microcontrôleur nécessite un investissement supplémentaire en temps et en énergie par rapport aux composants étudiés jusqu'à présent. Je vais donc commencer par quelques explications et vous guider pas à pas dans cette expérience pour la mise en œuvre d'un microcontrôleur Arduino, avec un test élémentaire. Avec les expériences 33 et 34, vous allez progresser dans la programmation de l'Arduino, en association avec d'autres composants.

La procédure de développement prend une à deux heures. Prévoyez de vous réserver ce temps pour suivre ces instructions sans être dérangé. Quand vous aurez terminé cette phase initiale, le reste sera plus simple.

Applications typiques

Une application typique pour un microcontrôleur pourrait ressembler à ceci :

- recevoir un signal d'entrée provenant d'un encodeur rotatif utilisé comme contrôle du volume d'un autoradio ;
- déterminer le sens de rotation de l'encodeur ;
- compter les impulsions transmises par l'encodeur ;
- indiquer à une résistance programmable le nombre de pas permettant d'augmenter ou d'abaisser le volume ;
- attendre d'autres signaux d'entrée.

Un microcontrôleur doit aussi supporter des applications plus complexes, comme l'utilisation de toutes ses entrées et toutes ses sorties, et prendre des décisions en association avec un système d'alarme comme celui de l'expérience 15. Il devrait alors contrôler l'état des capteurs, activer une sirène par l'intermédiaire d'un relais, recevoir et vérifier un code saisi sur un clavier quand l'arrêt de l'alarme est demandé – et bien davantage.

Toutes les automobiles récentes contiennent des microcontrôleurs qui prennent en compte des actions complexes relatives au fonctionnement du moteur, ou plus simplement pour faire retentir un buzzer si vous avez oublié d'attacher votre ceinture.

Un microcontrôleur peut prendre en charge des tâches réduites mais importantes, comme celles des expériences précédentes, par exemple pour supprimer les rebonds d'un interrupteur ou générer une fréquence audible.

En ayant à l'esprit que ce minuscule circuit intégré peut faire de multiples choses, pourquoi ne pas l'utiliser partout ?

Le bon outil pour le bon usage

Un microcontrôleur est souple et puissant, mais il correspond mieux à certaines situations qu'à d'autres. Ainsi, il est idéal pour le traitement d'opérations logiques comme « si cela arrive, faire ceci, sinon faire cela », mais il ajoute coût et complexité à un projet et, bien entendu, il exige un apprentissage important afin de maîtriser un langage de programmation pour lui dire ce qu'il doit faire.

Si vous ne souhaitez pas apprendre le langage, vous pouvez télécharger et utiliser les programmes écrits par d'autres. De nombreux passionnés choisissent cette possibilité, car elle donne un résultat immédiat. Vous trouverez des milliers de programmes Arduino dans des bibliothèques de codes disponibles gratuitement en ligne.

Néanmoins, un programme ne fait pas toujours ce que l'on souhaite. Vous devrez inévitablement le modifier, ce qui revient à devoir comprendre le langage qui permet d'utiliser pleinement le microcontrôleur.

L'écriture d'un programme pour l'Arduino peut être relativement simple, selon son application. Cependant, ce n'est pas une tâche unique. Le code doit être vérifié et la procédure de modification et de mise au point prend parfois beaucoup de temps. Une petite erreur peut en effet provoquer des effets inattendus et empêcher toute action. Vous devez alors relire votre code, pour trouver les erreurs, puis réessayer.

Une fois que tout fonctionne, le résultat peut être impressionnant. C'est pour cette raison que je trouve la programmation d'un microcontrôleur intéressante, du moment que vos attentes sont réalistes.

Vous devez déterminer seul si c'est un sujet dans lequel vous souhaitez vous investir activement.

Une carte pleine de circuits intégrés

Tout d'abord, qu'est-ce qu'un Arduino ?

Ce n'est pas tout à fait un circuit intégré. Il s'agit d'une petite carte de circuit imprimé conçue par la société Arduino, contenant un microcontrôleur 328P-PU fabriqué par la compagnie Atmel ATmega. La carte comprend également un régulateur de tension, quelques connecteurs pour insérer des fils ou des LED, un oscillateur à cristal, un connecteur d'alimentation et un adaptateur USB pour communiquer avec un ordinateur (figure 5-79).

Si vous achetez directement un circuit intégré ATmega 328P-PU chez un fournisseur, il vous le vendra à moins d'un sixième du prix d'une carte Arduino Uno équipée de ce microcontrôleur. Dès lors, pourquoi payer autant, simplement pour obtenir ce petit circuit imprimé ? La réponse tient au fait que le développement de cette carte et du logiciel qui permet de l'utiliser n'est pas simple.

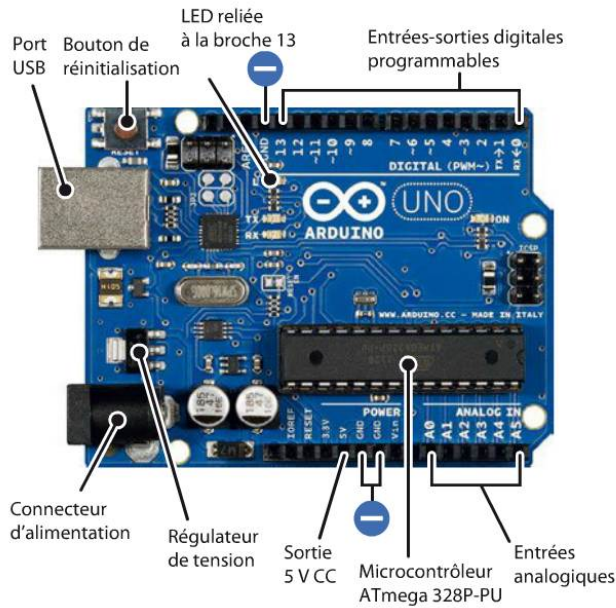


Figure 5-78. Carte Arduino Uno équipée du microcontrôleur ATmega 328P-PU fabriqué par Atmel.

Ce logiciel est un EDI ou *Environnement de développement intégré* (*Integrated Development Environment* en anglais, ou IDE). À installer sur votre ordinateur, l'EDI est un environnement très convivial qui permet d'écrire un programme, puis de le compiler, ce qui signifie que les instructions écrites en langage C (compréhensible par un être humain) sont converties en code machine (compréhensible par le circuit intégré Atmel). Ensuite, ce code est copié dans la mémoire du microcontrôleur ATmega.

Pour dissiper toute incompréhension, je vais résumer l'ensemble.

- Un Arduino est une carte de circuit imprimé sur laquelle est implanté un microcontrôleur Atmel.
- L'EDI écrit par la compagnie Arduino vous permet d'utiliser votre ordinateur pour écrire un programme destiné au microcontrôleur.
- Quand vous avez écrit le programme, l'EDI le compile, afin de générer un code que le circuit intégré comprend.
- Le code est ensuite envoyé par l'EDI au circuit intégré Atmel, qui le conserve dans sa mémoire.

Une fois que le code est dans le microcontrôleur, celui-ci n'a plus vraiment besoin de la carte Arduino pour fonctionner. En théorie, vous pourriez déconnecter le ATmega328 et l'utiliser par ailleurs – sur votre plaque de montage par exemple, ou dans un circuit que vous auriez

soudé. Le microcontrôleur continuerait à faire ce que votre programme a prévu, car le code est stocké dans sa mémoire.

En réalité, il subsiste quelques obstacles à cela. Vous pourrez en prendre connaissance en lisant des ouvrages d'initiation aux microcontrôleurs, comme *Le grand livre d'Arduino* d'Erik Bartmann (Eyrolles, 2015). Ils indiquent comment utiliser séparément le circuit intégré ATmega.

Vous n'aurez alors besoin que d'une seule carte Arduino, alors que vous pourrez vous procurer une grande quantité de circuits intégrés Atmel pour une somme modique. Vous n'aurez qu'à insérer un microcontrôleur sur la carte, le programmer, puis le retirer pour l'utiliser ensuite dans un autre projet. En insérant un autre microcontrôleur sur la carte, puis en le programmant différemment, vous pourrez l'utiliser dans un tout autre projet.

C'est assez facile si vous disposez de la version de la carte Arduino Uno utilisant un circuit intégré ATmega à broches traversantes, inséré dans un support. Il peut être extrait à l'aide d'un tournevis miniature et remplacé par un circuit intégré identique que vous devrez insérer dans le support en l'enfonçant délicatement avec vos doigts. Une autre version de l'Arduino Uno utilise un microcontrôleur monté en surface soudé sur la carte ; cette version ne permet pas d'utiliser le microcontrôleur par ailleurs.

Méfiez-vous des contrefaçons !

Maintenant que vous connaissez le concept de base, étudions comment le mettre en œuvre.

Il existe différents modèles de cartes Arduino ; celle que je vais utiliser est la Uno, dans sa version R3 ou plus récente.

Vous pouvez vous procurer cette carte très facilement, car elle a été conçue et commercialisée sous une licence *open source* (c'est-à-dire à code ouvert), ce qui permet à n'importe qui d'en fabriquer une copie, de même que chacun peut fabriquer un temporisateur 555 (mais pour des raisons différentes).

Les revendeurs internationaux Mouser, Digikey, Maker Shed, Sparkfun et Adafruit commercialisent tous les versions originales des produits Arduino. Plusieurs distributeurs de l'hexagone distribuent également les produits Arduino (Conrad, Selectronic, Radiospares, Farnell et bien d'autres). Sur eBay, vous pourrez trouver des copies qui ne sont pas fabriquées sous licence Arduino pour un tiers du prix d'une carte originale. Pour déterminer quel type de carte vous avez, il suffit de vérifier qu'elle porte bien le logo de la figure 5-80.



Figure 5-80. Seules les cartes fabriquées par la société Arduino ou sous licence Arduino portent ce logo.

Les cartes qui ne sont pas fabriquées sous licence Arduino sont néanmoins parfaitement légales. Cela n'est pas comparable à l'acquisition d'un logiciel piraté ou d'une œuvre musicale illégalement obtenue. La marque Arduino est le seul élément que la société du même nom a choisi de garder sous contrôle. Certains contrefacteurs utilisent illégalement le logo Arduino, mais leur prix dérisoire indique qu'il ne s'agit pas de versions originales. Pour rendre les choses encore plus compliquées, en raison d'un désaccord entre la société Arduino et son fabricant historique, des cartes authentiques sont également fabriquées en dehors des États-Unis, sous la marque Genuino.

L'imitation d'une carte Arduino Uno est-elle fiable ? Je ferais confiance à celles distribuées par Adafruit, Sparkfun et quelques autres. Je ne les ai pas toutes testées ; c'est à vous de décider à ce sujet, en fonction des commentaires des autres acheteurs ou de votre impression concernant un fournisseur. Rappelez-vous que vous n'avez qu'une carte à acheter pour pouvoir programmer de nombreux circuits intégrés Atmel, selon la procédure décrite plus haut. De ce fait, dépenser un peu plus pour acheter un produit original Arduino n'est pas inutile. De plus, en faisant cet achat, vous contribuez au développement de nouveaux produits Arduino.

Personnellement, j'achète toujours des produits Arduino originaux.

Mise en œuvre

Vous disposez maintenant d'une carte Arduino Uno ou d'un clone en lequel vous avez confiance. Il vous faut également un câble USB muni d'un connecteur de type A à une de ses extrémités et d'un connecteur de type B à l'autre (figure 5-81). Ce câble n'est en général pas fourni quand vous achetez la carte. Vous pouvez récupérer celui d'un autre appareil pour réaliser les tests, au début.



Figure 5-81. Vous aurez besoin de ce type de câble USB pour relier votre carte Arduino Uno à votre ordinateur.

Il vous faut maintenant télécharger l'EDI. Rendez-vous sur le site Arduino (<https://www.arduino.cc/>) et cliquez sur l'onglet Download, puis choisissez le logiciel Arduino qui correspond à votre système d'exploitation (Windows, Mac OS ou Linux).

Notez que vous devez posséder un ordinateur qui fonctionne sous Windows XP ou plus récent, Mac OS 10.7 ou plus récent, ou une distribution Linux 32 ou 64 bits. Ces exigences sont valables à la date d'écriture de ce livre et sont susceptibles d'être modifiées.

La procédure de mise en œuvre que je vais décrire est basée sur les instructions du très bon livre *Getting Started with Arduino* de Massimo Banzi et Michael Shiloh. Vous pouvez également trouver des instructions d'installation dans différents sites Internet, comme ceux d'Arduino, évidemment, mais aussi d'Adafruit ou de Sparkfun.

En français, certains sites proposent de très bons tutoriels d'installation.

Rendez-vous par exemple sur <http://bit.ly/29tljHG> ou sur <http://bit.ly/29lvfjY>.

Je vais vous indiquer ce qui fonctionne pour chaque système, selon ma propre expérience.

Installation sous Linux

C'est de loin l'installation la plus compliquée car il existe de multiples versions du système d'exploitation Linux. Je m'en remets aux instructions du site Arduino, que je vous conseille de suivre.

Installation sous Windows

Ne reliez pas encore votre carte Arduino Uno à votre ordinateur. Identifiez d'abord la version du programme que vous avez téléchargée. En choisissant l'option Windows installer, son nom devrait ressembler à `arduino-1.6.9-windows.exe`. Le numéro de version (1.6.9) peut avoir évolué lorsque vous lirez ce paragraphe. Selon le paramétrage de votre système, l'extension `.exe` du fichier peut ne pas apparaître.

Certains guides indiquent que le fichier d'installation téléchargé est un fichier compressé qui doit être décompressé. Cette option existe en effet dans les options de téléchargement proposées (Windows ZIP file for non admin install). Je ne la recommande pas.

Double-cliquez sur l'icône d'installation et acceptez les termes de la licence (si vous refusez, vous ne pourrez pas installer le système). On vous demande ensuite si vous souhaitez installer un raccourci sur votre bureau ; à vous de décider. Puis, il vous est demandé d'approuver les composants à installer. Acceptez l'installation de tous les composants du logiciel. C'est ensuite le tour du répertoire d'installation de l'EDI ; acceptez celui proposé par défaut.

Après avoir terminé l'installation de l'EDI, reliez la carte Arduino Uno à votre ordinateur à l'aide du câble USB. Quand c'est fait, vous ne devez pas utiliser le petit connecteur d'alimentation rond de la carte Arduino. En effet, votre ordinateur fournit la tension d'alimentation à la carte par l'intermédiaire du câble USB. Gardez cependant à l'esprit qu'un câble court évitera une chute de tension importante. Si vous utilisez un ordinateur portable, la puissance fournie par la sortie USB pourrait être limitée à 250 mA. S'il s'agit d'un ordinateur de bureau, l'intensité maximale de 500 mA est partagée par plusieurs ports USB. Certains périphériques externes (par exemple, un disque dur) pourraient utiliser une quantité importante de la puissance disponible.

Observez la carte lorsque vous la reliez à votre ordinateur. Vous devriez voir une LED verte s'allumer de façon constante, ainsi qu'une LED jaune qui clignote. Deux autres LED marquées Tx et Rx devraient clignoter brièvement. Elles indiquent les échanges de données avec l'ordinateur.

Dans les dossiers, recherchez le raccourci du logiciel, qui s'appelle simplement Arduino, et double-cliquez dessus pour lancer l'EDI.

S'il vous est proposé une mise à jour du logiciel, vous pouvez accepter.

Dans la fenêtre qui s'est ouverte, cliquez sur le menu Outils et vérifiez que le type de carte est bien Arduino/Genuino Uno ; sinon, sélectionnez ce type de carte. Accédez ensuite au sous-menu Port ; une liste des ports disponibles sur votre ordinateur devrait apparaître, nommés « COM1 », « COM2 », et ainsi de suite.

Qu'est-ce qu'un port série ? Au début de Windows (et, encore avant, de MS-DOS), les ordinateurs n'étaient pas munis de prises USB. Ils utilisaient le « protocole série » et une prise en forme de lettre D, l'ordinateur reconnaissait le connecteur utilisé par son « numéro de port ». Ce système est toujours présent dans Windows, même si des décennies se sont écoulées depuis sa création et que ce protocole est devenu rare dans les applications non professionnelles.

Ce qui est important, c'est la correspondance entre le numéro de port affecté à votre carte Arduino Uno par Windows et le port renseigné dans l'EDI. Normalement, quand vous vous rendez dans le menu Outils>Port de l'EDI, vous verrez le port utilisé par votre carte Arduino Uno dans la liste, déjà coché. Si c'est le cas, sautez la section « Dépannage sous Windows » qui suit et allez directement à la section « Test du clignotement » page 266.

Dépannage sous Windows

Il y a deux possibilités qui peuvent expliquer une difficulté concernant le numéro de port affecté.

- Dans le sous-menu Port de l'EDI, vous voyez la carte Arduino Uno dans la liste, mais elle n'est pas cochée. Un autre port est affecté. Essayez de cocher le port correct. Vous pourriez recevoir un message d'avertissement de l'EDI vous prévenant du changement de port ; ignorez-le et effectuez le test du clignotement décrit plus loin.
- La liste ne vous propose pas de port identifié Arduino Uno. Dans ce cas, notez les noms des ports de la liste. Fermez le menu, puis déconnectez la carte de l'ordinateur. Attendez au moins cinq secondes, ouvrez à nouveau le sous-menu Port et notez le numéro de port qui a disparu de la liste. Fermez le sous-menu, rebranchez la carte Arduino Uno et ouvrez à nouveau le sous-menu. Il suffit alors de cocher le port qui est réapparu dans la liste, vous pouvez maintenant continuer par le test du clignotement.

Il existe une option pour vérifier le paramétrage des ports utilisés. Ouvrez le menu Démarrer et entrez devmgmt dans le champ de recherche, ou passez par Panneau de configuration pour accéder au gestionnaire de périphériques. Dans la fenêtre qui s'ouvre, il sera peut-être nécessaire de vous rendre dans le menu Affichage et de cocher la case Afficher les périphériques cachés. Votre carte Arduino Uno devrait figurer dans la liste ; si elle est précédée d'un cercle rouge, ou d'un point d'exclamation jaune, faites un clic droit pour voir quel est le problème.

Si Windows signale qu'il lui est impossible de trouver le pilote correspondant à votre carte, indiquez-lui le répertoire où le programme d'installation a placé les fichiers décompressés.

Un problème de confusion des ports par l'EDI Arduino est connu, dans le cas où plus de neuf ports sont déjà utilisés. C'est peu fréquent, mais si vous rencontrez ce problème, essayez de désactiver certains ports ou d'affecter manuellement un port non utilisé, dont le nom ne comporte qu'un seul chiffre. Si le problème persiste, rendez-vous à la section « Si tout a échoué » un peu plus loin.

Installation sous Mac OS

Après avoir téléchargé le programme d'installation, recherchez l'icône correspondante et double-cliquez dessus. Vous verrez alors l'image d'un disque contenant le logiciel EDI Arduino. Vous pouvez déplacer cette icône dans le dossier des applications, ou dans tout autre dossier à votre convenance.

Reliez maintenant votre carte à l'ordinateur grâce au câble USB.

Lorsque votre carte est reliée à l'ordinateur, il est inutile d'utiliser son connecteur d'alimentation : elle est alimentée par le câble USB.

Observez votre carte lorsque vous la reliez à votre ordinateur. Vous devriez voir une LED verte s'allumer de façon constante, ainsi qu'une LED jaune qui clignote. Deux autres LED marquées Tx et Rx devraient clignoter brièvement. Elles indiquent les échanges de données avec l'ordinateur.

Si une fenêtre vous indique qu'une nouvelle interface réseau vient d'être détectée, cliquez sur Préférences réseau, puis Appliquer. Si vous voyez que la carte Arduino Uno est Non configurée, n'en tenez pas compte. Fermez la fenêtre.

Double-cliquez sur l'icône du programme Arduino EDI que vous avez déplacée dans le répertoire de vos applications. Vous devrez ensuite choisir le port de communication de la carte. Dans le menu Outils de l'EDI, cliquez sur l'option Port série et choisissez /dev/cu.usbmodemfa141 (ou un port au nom voisin) dans la liste proposée.

Si tout s'est passé correctement, vous pouvez vous rendre à la section « Test du clignotement » un peu plus bas.

Si tout a échoué

Ce livre devrait être longtemps disponible. En tout cas, c'est ce que je souhaite ! Comme les logiciels évoluent très vite, mes instructions d'installation de l'Arduino Uno pourraient devenir obsolètes. Je modifierai ces instructions dans chaque réédition du livre, afin qu'elles demeurent aussi correctes que possible. Il se pourrait, cependant, que vous ayez entre vos mains une version ancienne du livre.

Dès lors, que faire ? La meilleure solution est de vous rendre sur le site Arduino, ou sur celui de Sparkfun, ou tout autre site récemment mis à jour, et de consulter les instructions d'installation. Un site web est plus facilement et plus rapidement mis à jour qu'un livre.

Test du clignotement

Une fois l'exécution de l'EDI Arduino lancée. La fenêtre affichée devrait ressembler à celle de la figure 5-82, bien que les versions à venir puissent la modifier quelque peu.

Avant de faire accomplir une tâche à votre Arduino Uno, vous devez vérifier que le logiciel a correctement identifié le type de votre carte.

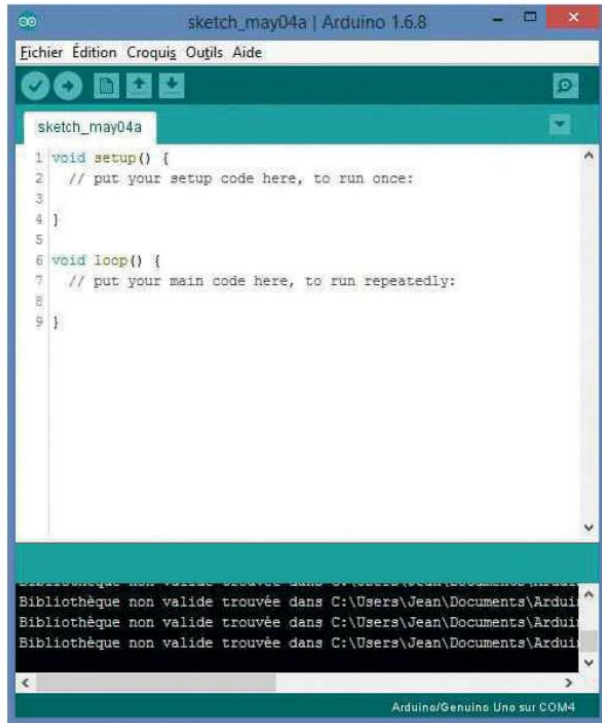


Figure 5-82. Fenêtre ouverte par défaut au lancement de l'EDI Arduino.

Dans la fenêtre de l'EDI, ouvrez le menu Outils et vérifiez que le type de la carte indiqué est bien Arduino/Genuino Uno, comme sur la figure 5-83 ; sinon, choisissez le type correct de carte dans le sous-menu.

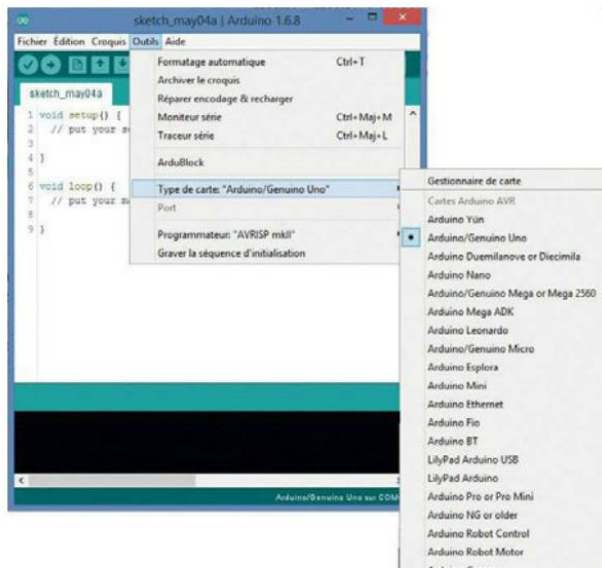


Figure 5-83. Pour utiliser l'EDI Arduino, il est nécessaire de préciser le type de la carte.

Vous voici prêt à donner des instructions à votre carte. En haut de l'interface de l'EDI, l'intitulé de la fenêtre devrait être *sketch*, suivi de la date du jour en anglais (bien que le logiciel ait été francisé). À quoi correspond le terme *sketch* ? En français, cela se traduit par « croquis », ce qui, dans le jargon Arduino, est identique à « programme ». Les développeurs Arduino ont sans doute choisi ce nom pour ne pas effrayer les utilisateurs des cartes Arduino en leur parlant de programmation comme dans le cas d'un ordinateur. Pour les mêmes raisons, Steve Jobs pensait qu'il serait plus agréable aux utilisateurs d'appareils mobiles, de parler d'applications, plutôt que de programmes. Il avait probablement raison. Mais je ne pense pas que cela puisse intimider les passionnés dont vous faites maintenant partie. En fait je crois qu'ils ont envie de programmer. Sinon, pourquoi me liraient-ils ? Par la suite, j'utiliserai le terme « programme » car c'est bien ce dont il s'agit. Dans les publications que l'on trouve en ligne, les auteurs utilisent indifféremment les trois termes.

Rappelons la séquence d'actions que nous allons suivre. En premier, vous allez *écrire un programme* dans l'EDI Arduino. Puis vous le *compilerez*, en utilisant une option du menu, afin de le convertir en instructions compréhensibles par le microcontrôleur. Finalement, vous le transmettez à la carte Arduino Uno qui *exécutera automatiquement votre programme*.

La fenêtre principale de l'EDI contient des indications par défaut (figure 5-83). Les versions futures du logiciel pourraient se présenter différemment, mais le principe resterait le même. Vous pouvez voir quelques lignes commençant par deux barres obliques (*slash*), comme la suivante :

```
// put your setup code here, to run once:
```

Il s'agit d'une ligne de commentaire. C'est utile aux programmeurs pour indiquer ce qui se passe dans le code.

Quand le programme que vous avez écrit est ensuite traduit en langage machine, le compilateur ignore les lignes de commentaires commençant par *//*.

La ligne précédente indique :

```
void setup() {
```

C'est une ligne de programme, que le compilateur et le microcontrôleur devront comprendre. Vous devez également savoir ce qu'elle signifie, car la fonction `setup()` (initialisation) doit se trouver en début de tout programme Arduino.

Le mot `void` indique au compilateur que cette procédure ne fournira aucune valeur numérique en retour, après s'être exécutée.

Le terme `setup()` indique que la procédure qui suit ne se déroulera qu'une fois, au début de l'exécution du programme.

Notez la présence d'une accolade `{` à la suite de `setup()`. Toute fonction écrite en langage C doit être située entre deux accolades `{` et `}`. Une accolade ouverte `{` doit toujours être suivie d'une accolade fermée `}`. Cette dernière se situe quelques lignes plus bas. Les deux accolades ne contiennent rien pour le moment, ce qui signifie qu'elles ne fournissent aucune instruction. Vous allez devoir les écrire.

Il est normal que les accolades `{` et `}` se trouvent à des lignes différentes. Le compilateur Arduino ignore les séparations de lignes ainsi que tous les espaces supérieurs à l'espace entre deux mots.

Nous pouvons maintenant écrire quelque chose dans les lignes situées à la suite de `// put your setup code here, to run once`, ce qui se traduit par `// placez ici les instructions d'initialisation, qui ne seront exécutées qu'une fois`. Ajoutez la ligne suivante :

```
pinMode(13, OUTPUT);
```

Vous devez respecter précisément la syntaxe. Le compilateur ne tolère aucune erreur typographique, car le langage C est *sensible à la casse* ; vous devez donc respecter l'usage des lettres minuscules et majuscules. `pinMode` doit être écrit ainsi, ni `pinmode` ni `Pinmode`. `OUTPUT` doit être écrit ainsi, et non pas `output` ou `Output`.

Le mot `pinMode` est une commande de l'Arduino Uno qui lui indique comment il doit utiliser une de ses broches. Une broche peut se comporter comme une entrée recevant des données, ou comme une sortie envoyant des données. Le numéro 13 identifie la broche à laquelle on s'adresse. Si vous regardez votre carte Arduino Uno, vous verrez le nombre 13 imprimé près d'un des petits connecteurs situés à droite, près de la LED jaune. J'ai choisi la broche 13 de façon arbitraire.

Un point-virgule marque la fin de l'instruction.

Il ne faut jamais oublier de terminer l'instruction par un point-virgule.

Déplacez le curseur sur la ligne qui suit ce commentaire :

```
// put your main code here, to run repeatedly:
```

Le double slash vous indique que c'est une ligne de commentaire. Le compilateur va donc l'ignorer. Entrez les instructions suivantes sur la ligne suivante :

```
void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(100);
}
```

C'est le programme que la plupart des utilisateurs lancent comme test initial. J'ai modifié les valeurs de délai, pour des raisons que je détaillerai plus loin ; il provoque le clignotement de la LED.

`loop()` est une instruction qui indique au microcontrôleur qu'il doit exécuter de façon répétitive les instructions contenues entre les deux accolades qui suivent.

`digitalWrite()` est une commande qui envoie une information sur une broche de sortie. J'ai spécifié la broche 13, car son mode de fonctionnement a été précédemment défini.

Il est impossible d'utiliser une broche digitale sans avoir préalablement défini son mode de fonctionnement.

Cette broche va passer à l'état HAUT (HIGH).

N'oubliez pas le point-virgule à la fin de l'instruction.

`delay` indique au microcontrôleur Arduino d'attendre pendant un laps de temps. 100 indique 100 millisecondes. Durant cet intervalle de temps, la broche 13 restera à l'état HAUT.

Les deux lignes suivantes signifient que la broche 13 passera à l'état BAS et restera ainsi pendant 100 millisecondes.

Avant de mettre ce programme en action, reliez les fils d'une LED entre la broche marquée 13 et celle marquée GND (masse) qui est proche.

- Assurez-vous que le fil court de la LED est inséré dans la broche de masse (GND).

- La LED n'a pas besoin d'une résistance en série, car celle-ci est prévue dans la broche 13.

La petite LED jaune clignotait déjà sur ma carte, aussitôt que je l'avais reliée à l'ordinateur. C'est le comportement par défaut d'une carte Arduino Uno neuve. La LED que vous venez d'insérer clignote aussi, car la petite LED jaune est également reliée à la broche 13.

Dans les précédentes versions de la carte Arduino Uno, la LED de la carte ne clignotait pas à la première mise sous tension. Dans le futur, Arduino pourrait supprimer ce clignotement par défaut. Peu importe, car votre programme va modifier ce comportement.

Vérification et compilation

Vous devez maintenant vérifier si vous avez commis une erreur de frappe. Accédez au menu Croquis et choisissez Vérifier/Compiler (figure 5-84). Après avoir demandé le nom sous lequel votre programme doit être sauvegardé, l'EDI examine le code ; si un problème est détecté, il vous l'indique.

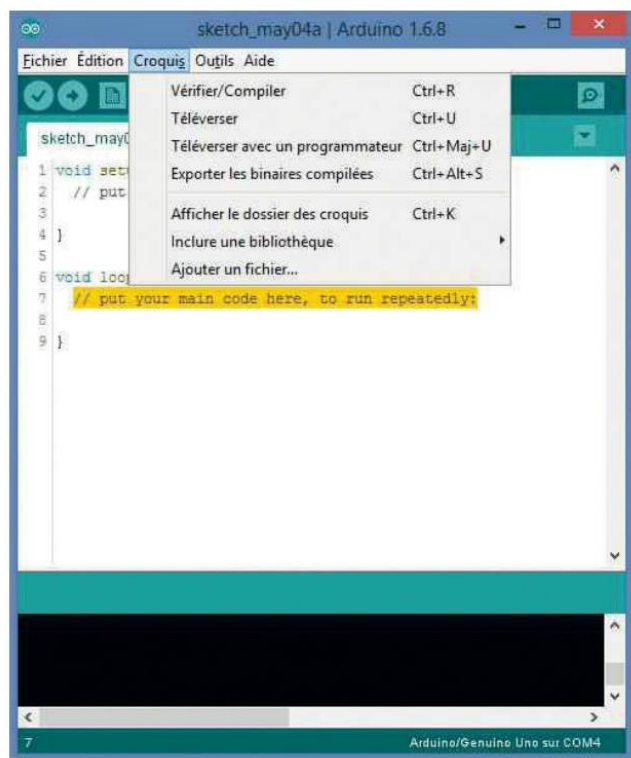


Figure 5-84. Choisissez l'option Vérifier/Compiler avant d'envoyer votre programme à la carte Arduino Uno.

Vous pouvez essayer de faire cette vérification, en écrivant par exemple `piMode` au lieu de `pinMode`. Un message d'erreur sera alors inscrit dans la zone noire, en bas de la fenêtre de l'EDI. Pour voir plus de deux lignes de messages, agrandissez cette zone en tirant vers le haut sa limite supérieure avec votre souris. Le message d'erreur est `piMode was not declared in this scope`, ce qui signifie `piMode` n'a pas été déclaré dans ce périmètre. Vous remarquerez que les messages d'erreur sont exprimés en anglais, mais avec un peu d'habitude, il est assez facile de les comprendre.

Si vous lancez une recherche sur Internet avec les arguments « *was not declared in this scope* », vous obtiendrez de nombreux sites qui expliquent ce problème et ses raisons, ce qui vous aidera à corriger votre erreur.

Comme vous le voyez, dans le langage C, il y a des *mots réservés* et des *fonctions prédéfinies* qui ont des significations spécifiques. Vous en avez déjà utilisé plusieurs, comme `digitalWrite` et `delay`. En revanche, `piMode` n'est pas un mot réservé ni une fonction prédéfinie ; le compilateur signale que vous ne l'avez pas déclaré pour lui indiquer ce dont il s'agit.

Corrigez votre programme jusqu'à ce que vous puissiez Vérifier/Compiler sans erreur.

Téléversement et exécution

Accédez au menu Croquis et choisissez l'option Téléverser. Si le téléversement réussit, vous voyez le message Done uploading s'afficher dans la fenêtre de l'EDI.

S'il échoue ou si le téléversement dure indéfiniment, il subsiste des problèmes de communication, probablement parce que le port COM affecté à la carte ne correspond pas à la réalité. Revenez à la section « Dépannage », après avoir sauvegardé votre programme par le menu Fichier, option Enregistrer, ou Enregistrer sous si vous souhaitez modifier son nom. Après avoir résolu le problème de communication, vous pourrez rouvrir votre programme et essayer à nouveau de le téléverser.

Si tout a bien fonctionné, selon les instructions de votre programme, la LED jaune de la carte Arduino Uno et votre LED devraient clignoter rapidement – allumées pendant 1/10 s et éteintes pendant la même durée.

Vous pensez probablement que c'est un résultat bien maigre après tant d'étapes, mais il faut bien débiter et faire clignoter une LED est souvent la première action

que l'on fait réaliser à un microcontrôleur. Le programme de l'expérience suivante accomplit une tâche bien plus utile.

Résumons ce qui doit être fait pour programmer un Arduino :

- Commencez un nouveau programme (« croquis », selon la terminologie Arduino). Choisissez pour cela l'option Nouveau du menu Fichier.
- Chaque programme doit commencer par la fonction `setup` qui n'est exécutée qu'une seule fois.
- Avant de pouvoir l'utiliser, vous devez indiquer le numéro de la broche choisie et son mode de fonctionnement en utilisant la fonction `pinMode`.
- Le mode est impérativement défini par un des deux termes réservés INPUT et OUTPUT (signifiant respectivement *Entrée* et *Sortie*).
- Certains numéros de broches ne sont pas valides. Regardez votre carte Arduino Uno pour voir la numérotation utilisée.
- Deux accolades sont utilisées pour définir le corps d'une fonction du programme ; elles peuvent se situer sur deux lignes différentes.
- Le compilateur ignore les retours à la ligne et les espaces inutiles.
- Chaque instruction à l'intérieur d'une fonction ou d'un bloc de programme doit se terminer par un point-virgule.
- Chaque programme Arduino doit contenir la fonction `loop` (située après la fonction `setup`), qui sera exécutée de façon répétitive.
- La commande `digitalWrite` sert à définir l'état de sortie d'une broche à l'aide du mot-clé HIGH (haut) ou LOW (bas).
- `delay` provoque l'arrêt du microcontrôleur (pause) pendant un temps exprimé en millisecondes (millièmes de seconde).
- Les nombres entre parenthèses situés après une commande sont appelés *paramètres*. Ils indiquent à l'Arduino comment la commande doit se comporter.
- Utilisez l'option Vérifier/Compiler du menu Croquis pour vérifier votre programme avant d'essayer de le téléverser dans la carte Arduino Uno.

- Vous devez corriger toutes les erreurs détectées lors de la compilation.
- Les mots-clés sont des mots réservés qui sont compris par l'EDI Arduino. Vous devez respecter strictement leur syntaxe. Les lettres majuscules sont interprétées différemment des minuscules.
- Après avoir téléversé votre programme, il s'exécutera automatiquement et continuera ainsi jusqu'à ce que vous coupiez l'alimentation de votre carte, ou qu'un autre programme soit téléversé.
- Un bouton de réinitialisation (*reset*), est présent sur votre carte, proche du connecteur USB. Quand vous l'activez, le microcontrôleur relance votre programme depuis le début, toutes les variables étant réinitialisées.



Attention à la perte de code !

Si vous modifiez et téléversez votre code dans le microcontrôleur, le programme précédent sera écrasé. En d'autres termes, l'ancien programme sera totalement effacé. Si vous ne l'avez pas préalablement sauvegardé sur votre ordinateur, il sera définitivement perdu. Faites bien attention de sauvegarder chaque version avec un nom différent, c'est une précaution importante.

Après avoir téléversé les commandes d'un programme dans le microcontrôleur, il n'existe aucun moyen de les récupérer sur votre ordinateur.

Comportement d'un programme

Vous avez probablement remarqué que le nombre d'informations à mémoriser est plus important que dans toutes les expériences mettant en œuvre des composants individuels. L'écriture d'un programme est un travail très minutieux et tout doit être précisé scrupuleusement. Lorsque les règles sont respectées, le résultat est toujours correct et le fonctionnement toujours identique. Si vous sauvegardez chaque programme sur un support adapté, il restera valable longtemps. Les programmes que j'ai écrits dans les années 1980 fonctionnent toujours, 30 ans plus tard, dans une fenêtre DOS de mon ordinateur.

Certaines personnes n'apprécient pas les travaux minutieux ou, parce qu'ils font de nombreuses erreurs de syntaxe, ils n'aiment pas les exigences inflexibles d'un langage de programmation (par exemple commencer *toujours* un programme par la fonction `setup`, même si

vous n'avez rien à initialiser). Il y a bien des façons d'apprécier les différents aspects de l'électronique. Si tout le monde voulait écrire des programmes sans manipuler les composants, il n'y aurait pas d'ordinateur. C'est à vous de choisir les activités qui vous conviennent le mieux.

Je vais poursuivre par une autre expérience plus intéressante, utilisant également une carte Arduino. Je veux vous montrer que dans certains cas, un microcontrôleur peut accomplir des fonctions beaucoup plus facilement que des composants individuels.

Déconnecter la carte

Avant de terminer, voyons ce qui se passe quand vous déconnectez la carte Arduino Uno de votre ordinateur.

- La carte doit être alimentée pour pouvoir *exécuter* votre programme.
- En revanche, l'Arduino ne nécessite pas d'alimentation pour conserver votre programme. Ce dernier est automatiquement stocké dans la mémoire non-volatile du microcontrôleur, comme les données dans une clé USB.
- Si vous souhaitez exécuter votre programme, alors que la carte Arduino Uno n'est pas reliée à l'ordinateur, vous devez l'alimenter par l'intermédiaire de la prise ronde noire proche du connecteur USB.
- La tension d'alimentation doit être comprise entre 7 V CC et 12 V CC. La carte possède son propre régulateur, transformant la tension d'alimentation en 5 V CC. D'autres cartes Arduino utilisent une tension de 3,3 V.
- Le diamètre de la prise jack d'alimentation est de 2,1 mm. Le pôle positif doit être relié à la broche centrale. Vous pouvez vous procurer un adaptateur secteur 9 V CC muni de ce type de connecteur à l'extrémité de son câble d'alimentation.
- Si vous reliez une alimentation externe alors que votre carte Arduino est également reliée à votre ordinateur, la carte utilise automatiquement la source externe.
- Vous pouvez déconnecter la carte de votre ordinateur à tout moment, sans passer par la procédure de déconnexion habituelle. Retirez le périphérique en toute sécurité de Windows.

Historique : origines et types des circuits intégrés programmables

Dans les usines et les laboratoires, de nombreuses procédures sont répétitives. Un capteur de débit peut devoir contrôler un élément chauffant. Un détecteur de mouvement peut avoir à contrôler la vitesse d'un moteur. Les microcontrôleurs sont parfaits pour ce type de tâches routinières.

La société General Instrument a créé la première série de microcontrôleurs en 1976, sous la dénomination PIC, signifiant *Programmable Intelligent Computer* (calculateur intelligent programmable) ou parfois *Programmable Interface Controller* (interface de contrôle programmable), selon les sources. General Instrument a cédé la marque PIC à la société Microchip Technology, qui en est actuellement propriétaire.

Arduino utilise les microcontrôleurs Atmel, mais les microcontrôleurs PIC sont une alternative possible, dont une version spécifique est utilisée comme base de systèmes d'apprentissage de la société British Education Ltd. Ils nomment leur gamme de circuits intégrés PICAXE.

Le PICAXE possède son propre EDI, utilisant le BASIC, qui est un langage de programmation différent. Il est en particulier d'un abord plus facile que le langage C. BASIC Stamp, une autre gamme de microcontrôleurs, utilise également le BASIC, auquel ont été ajoutées des commandes puissantes.

Vous trouverez sur Wikipédia une excellente présentation de toutes les possibilités du circuit PICAXE.

À l'inverse d'Arduino, il n'est pas nécessaire de vous procurer une carte spéciale pour programmer les circuits intégrés PICAXE. Seuls un câble USB spécifique et le logiciel EDI approprié sont nécessaires. La première édition de ce livre contenait une introduction aux microcontrôleurs PICAXE.

Fondamentaux : avantages et inconvénients

Maintenant que vous connaissez les bases, nous devons aborder les points qui peuvent déterminer votre décision d'utiliser ou non un microcontrôleur dans un projet.

Longévité

La mémoire flash qui stocke le programme dans un ATmega328 est garantie pour 10 000 opérations de lecture/écriture par son fabricant, avec une fonction de verrouillage automatique des emplacements mémoire défectueux. Cela peut paraître amplement suffisant, même si l'on peut souhaiter qu'un microcontrôleur dure indéfiniment. On ignore s'il possède une longévité comparable à celle de nos bons vieux circuits intégrés qui peuvent fonctionner encore 40 ans après leur sortie de l'usine. À vous de voir si c'est un critère de choix important.

Obsolescence

Les microcontrôleurs évoluent aussi rapidement que la technologie. Quand j'ai écrit la première édition de ce livre, la série Arduino venait d'apparaître mais son futur était incertain. Elle domine actuellement le marché des passionnés d'électronique, mais qui sait ce qu'il en sera dans 5 ans ? Un produit comme le Raspberry Pi est un ordinateur complet en un seul circuit intégré. Personne ne peut prédire s'il remplacera l'Arduino.

Même si l'Arduino demeure un système de choix, de nouvelles versions des cartes sont apparues et des mises à jour de l'EDI doivent être utilisées pour programmer le microcontrôleur. D'une manière ou d'une autre, vous devrez être au courant des évolutions de ce secteur et vous pourriez même devoir abandonner une marque de microcontrôleurs au profit d'une autre.

En comparaison, dans la plupart des cas, les composants individuels de type traversant ont atteint la fin de leur cycle de développement. Certaines innovations récentes ont été ajoutées, comme les encodeurs rotatifs ou les petits écrans LCD et LED. Pour la plupart, ces nouveaux éléments sont conçus pour être utilisés avec des microcontrôleurs. Dans le monde des transistors, des diodes, des circuits intégrés logiques et des amplificateurs intégrés en un seul composant, les connaissances que vous avez acquises seront encore valables dans 10 ans.

Circuits hybrides

Pour terminer, et c'est probablement le point le plus important, les microcontrôleurs ne peuvent pas être utilisés seuls. Ils ont toujours besoin d'être associés à d'autres composants, même s'il ne s'agit que d'un interrupteur, une résistance, une diode, ou une LED ; ces autres composants doivent être compatibles avec leurs entrées/sorties.

En considérant tous ces points, il m'est possible de résumer ainsi les avantages et les inconvénients.

Avantages des composants individuels

- Simplicité ;
- résultat immédiat ;
- aucune programmation nécessaire ;
- faible coût pour les petits projets ;
- les connaissances actuelles demeurent valables pour le futur ;
- mieux adaptés aux applications analogiques comme l'audio ;
- nécessaires aux circuits utilisant des microcontrôleurs.

Inconvénients des composants individuels

- Ils ne peuvent assurer qu'une fonction ;
- la conception des circuits destinés à des applications logiques est ardue ;
- il est difficile de faire évoluer la complexité d'un circuit. Les circuits de systèmes complexes sont difficiles à réaliser ;
- les évolutions d'un circuit sont difficiles, voire impossibles ;
- en général, plus un circuit comprend de composants, plus il consomme d'énergie.

Avantages des microcontrôleurs

- Ils sont polyvalents et à même de réaliser plusieurs fonctions ;
- les modifications ou extensions des circuits sont facilitées (simple réécriture du code) ;
- choix immense de bibliothèques d'applications en ligne ;
- solution idéale pour le développement de systèmes logiques complexes.

Inconvénients des microcontrôleurs

- Le coût des circuits simples est plus important ;
- des compétences importantes en programmations sont nécessaires ;

- le processus de développement est lent : écriture du code, installation des programmes, modifications et débogage, réinstallation – en plus de la recherche des erreurs dans les circuits conventionnels associés ;
- technologie en évolution rapide nécessitant un effort de formation permanent ;
- chaque microcontrôleur a ses propres caractéristiques et fonctions sophistiquées qu'il est nécessaire d'étudier et de mémoriser ;
- davantage de complexité multiplie le risque d'erreurs ;
- nécessité d'utiliser un ordinateur de bureau ou un ordinateur portable et des moyens de stockage pour les programmes. Une perte accidentelle de données n'est pas à écarter ;
- ils nécessitent une alimentation stable de 5 V CC ou de 3,3 V CC, comme les circuits intégrés logiques. Leur puissance de sortie ne dépasse pas 40 mA par broche, parfois moins. Ils sont incapables de piloter un relais ou un haut-parleur, à l'inverse d'un temporisateur 555. Vous devez vous procurer un circuit intégré additionnel si vous devez fournir une puissance plus élevée.

Pour résumer

Nous pouvons maintenant répondre à cette question : est-il préférable d'utiliser un microcontrôleur ou des composants individuels ? La réponse est simple : les deux sont nécessaires. C'est pourquoi j'ai inclus les microcontrôleurs dans ce livre principalement axé sur l'utilisation des composants classiques.

Dans l'expérience suivante, je vais vous montrer comment un capteur et un microcontrôleur peuvent être associés.

Expérience 33 : évaluer son environnement

Un interrupteur est soit fermé, soit ouvert, alors que la plupart des informations qui caractérisent notre environnement varient entre deux extrêmes. Par exemple, une thermistance est un capteur dont la résistance électrique varie selon une plage étendue de températures.

Comme il est capable de traiter ce type de données d'entrée, un microcontrôleur sera très utile pour cet usage. Il pourrait par exemple recevoir en entrée la valeur d'une thermistance et fonctionner comme un thermostat,

mettant en marche le chauffage quand la température baisse en dessous d'une valeur minimale et le stoppant quand la pièce est suffisamment chaude.

Le microcontrôleur ATmega328 utilisé dans la carte Arduino Uno est capable de le faire, car il possède six entrées analogiques. Ces broches ne se contentent pas de détecter les niveaux logiques haut et bas ; elles les convertissent à l'aide d'un *convertisseur analogique-numérique* (CAN) interne.

La version 5 V de l'Arduino accepte une tension d'entrée comprise entre 0 et 5 V CC (en fait, la limite supérieure peut être modifiée, mais cela introduit une complexité que nous étudierons par la suite). Une thermistance ne génère pas une tension ; elle fait varier la valeur de sa résistance. Il va donc falloir trouver un moyen de générer une tension qui s'adapte à la variation d'une résistance.

Une fois ce problème résolu, le CAN intégré au microcontrôleur convertira la tension appliquée à l'une des broches analogiques en une valeur numérique comprise entre 0 et 1 023, car elle peut s'exprimer sous forme d'une valeur binaire de 10 bits ; de plus, le CAN n'est pas assez précis pour justifier une gamme plus étendue de valeurs avec une résolution plus faible (figure 5-85).

Lorsque le CAN fournit un nombre, votre programme doit le comparer avec une valeur objective et déclencher l'action adéquate – comme de changer l'état d'une broche de sortie dont la tension sera fournie à un relais qui activera le chauffage de la pièce.

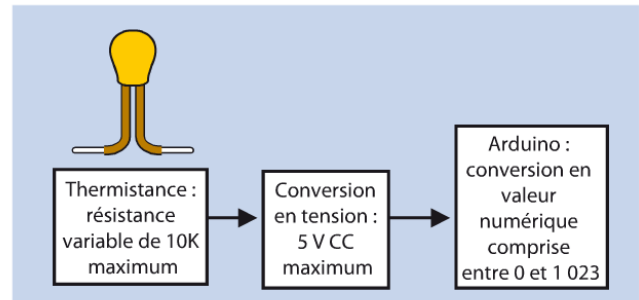


Figure 5-85. Séquence simplifiée de lecture de la valeur d'une thermistance.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, un multimètre

- 1 thermistance de 10K de précision 1 % ou 5 %. Cette thermistance doit être de type CTN, ce qui signifie à coefficient de température négatif, sa valeur diminuant quand la température augmente (à l'opposé, une thermistance CTP, à coefficient de température positif, se comporterait de façon inverse).
- 1 carte Arduino Uno
- 1 ordinateur de bureau ou portable avec un port USB disponible
- 1 câble USB muni d'une fiche de type A à l'une de ses extrémités et d'une fiche B à l'autre
- 1 résistance de 6,8K

Utilisation d'une thermistance

Pour commencer, prenons connaissance de notre thermistance. Elle possède des fils très fins, pour qu'ils ne conduisent pas ni n'absorbent la chaleur à leur extrémité, où se situe l'élément sensible à la température. Les fils sont probablement trop fins pour être insérés de façon fiable dans votre plaque de montage ; je vous suggère de les relier par des fils de test munis de pinces crocodiles, qui seront ensuite reliés à votre multimètre (figure 5-86).

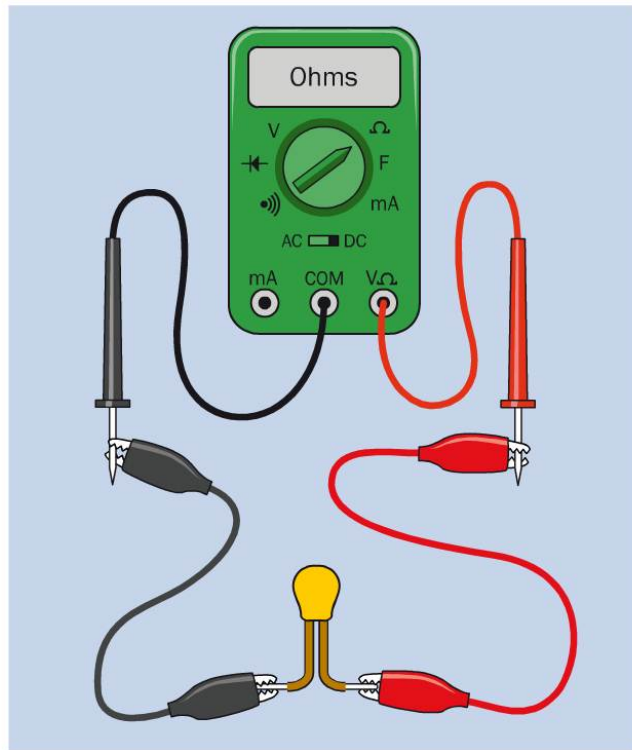


Figure 5-86. Test d'une thermistance.

La thermistance que je préconise est de 10K. C'est la valeur maximale de sa résistance, quand elle est vraiment froide. Sa résistance ne change pas beaucoup avec la température jusqu'à 25 °C ; au-delà, sa valeur chute plus rapidement.

Vérifiez-le à l'aide de votre multimètre. À température ambiante, la valeur de la thermistance devrait être d'environ 9,5K. Maintenez-la ensuite entre le pouce et l'index. En absorbant la chaleur de votre corps, sa résistance diminue. À la température du corps (normalement 37 °C), sa résistance est d'environ 6,5K.

Comment convertir cette valeur en une tension variant entre 0 et 5 V nécessaire au microcontrôleur ?

Rappelez-vous tout d'abord que la valeur maximale correspondant à la température ambiante d'une pièce d'habitation devrait être inférieure à 5 V. Son environnement étant totalement imprévisible, que se passerait-il si la température de votre thermistance devenait plus élevée que prévu, par exemple à cause de sa proximité du fer à souder, où parce qu'elle est à l'intérieur d'un dispositif électronique ?

Voici la première leçon à retenir en ce qui concerne la conversion analogique-numérique : il faut toujours prendre en considération les valeurs extrêmes lors de l'acquisition de paramètres environnementaux.

Gamme de conversion

La façon la plus simple de convertir la résistance d'une thermistance en tension consiste à choisir une résistance de valeur approximativement égale à la moyenne de la thermistance dans la gamme de températures choisie. Placez la résistance et la thermistance en série, afin de créer un pont diviseur. Reliez une des extrémités du pont à la tension d'alimentation de 5 V CC et l'autre à la masse. Prélevez ensuite la tension au point de liaison des deux composants (figure 5-87).

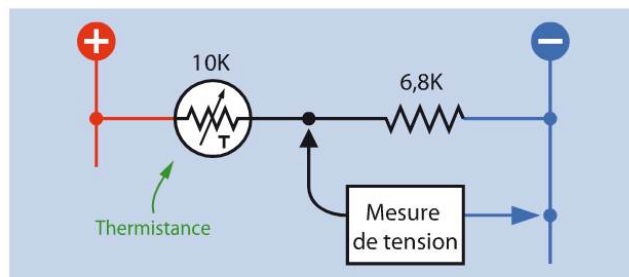


Figure 5-87. Circuit simple fournissant une tension variable en fonction de la valeur d'une thermistance.

Pour mettre en œuvre ce circuit, vous devriez normalement utiliser un régulateur délivrant une tension continue de 5 V CC. Cependant, la carte Arduino Uno possède son propre régulateur et un connecteur de sortie de la tension de 5 V CC (figure 5-79) ; reliez votre plaque de montage à cette sortie par un fil de test. Il vous faudra également prélever la masse sur la carte Arduino Uno et la router vers votre plaque de montage.

Avec ce montage et en provoquant une variation de la température de la thermistance de 25 à 37 °C, mon multimètre indique une tension variant entre 2,1 et 2,5 V. Vous devez faire ce test vous-même afin de déterminer les valeurs correspondant à votre thermistance.

Une surcharge du microcontrôleur n'est manifestement pas à craindre avec ces tensions, mais un autre problème risque de se produire : la gamme de tensions obtenue n'est pas assez étendue pour obtenir une précision optimale.

La figure 5-88 montre la conversion de la tension d'entrée en valeurs numériques. La plage de mesures située entre 2,1 et 2,5 V est colorée en bleu. Elle sera convertie en valeurs comprises approximativement entre 430 et 512, avec une différence de seulement 82, ce qui est une fraction de la plage totale comprise entre 0 et 1 023.

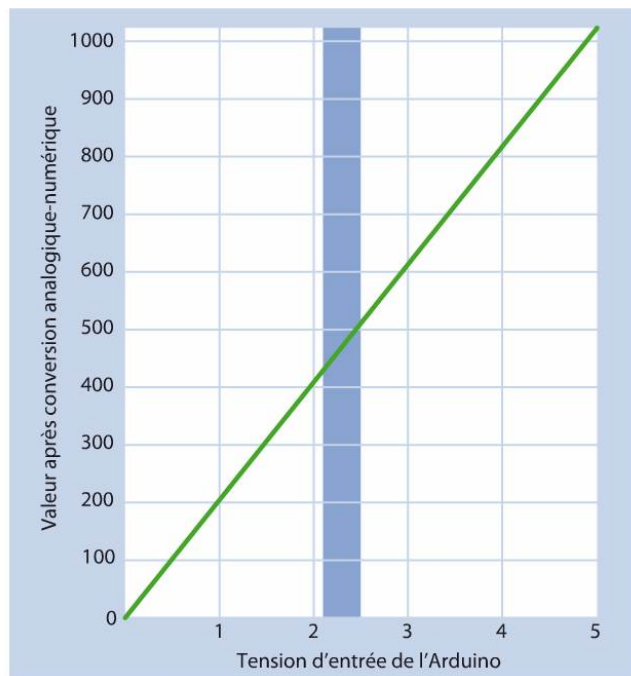


Figure 5-88. Courbe de conversion de la tension d'une entrée analogique en valeur numérique par le CAN de l'Arduino. Le rectangle bleu représente les tensions obtenues par le pont diviseur constitué d'une thermistance de 10K et d'une résistance de 6,8K, pour une plage de températures variant de 25 à 37 °C.

Cette gamme de valeurs limitée peut être comparée à une photo en haute résolution à laquelle on ôterait des pixels : des détails disparaîtraient inévitablement. Il serait alors préférable de convertir notre tension en une gamme de valeurs numériques plus importante, par exemple 500, au lieu de 82.

On pourrait y parvenir en amplifiant la tension, à l'aide d'un amplificateur opérationnel par exemple. Ce serait possible, mais il faudrait en plus prévoir une résistance pour contrôler son gain. Tout cela deviendrait trop compliqué, alors que l'objectif dans l'utilisation d'un microcontrôleur est de simplifier les choses !

Une meilleure solution consiste à utiliser une possibilité de l'Arduino qui permet de définir la valeur maximale de la plage de tensions d'une entrée analogique. Je dois pour cela appliquer cette tension à une autre broche d'entrée analogique, en utilisant un autre pont diviseur, puis recalculer les valeurs délivrées par le CAN. Toutefois, je vais éviter de le faire avant d'avoir réussi à faire fonctionner un programme simple.

En y réfléchissant un peu plus, je peux peut-être me contenter de cette variation de 82 valeurs pour représenter une gamme de températures allant de 25 à 37 °C. Cela me donne une précision d'un quart de degré pour chaque pas du CAN ; ce serait insuffisant s'il s'agissait d'un thermomètre médical, mais c'est largement assez pour la température d'une pièce.

Connexions

Pour cela, allons-nous continuer à utiliser une plaque de montage séparée, avec cette drôle de carte Arduino Uno sur laquelle est inséré le microcontrôleur ? Oui, c'est le but. Il y a trois manières de faire.

- Vous pouvez vous procurer un gadget appelé *shield*. C'est une carte de prototypage comparable à une platine de montage, qui se place au-dessus de la carte Arduino Uno et s'insère dans ses connecteurs. Je ne suis pas adepte de cette solution car elle nous éloigne de l'utilisation des plaques de montage.
- Vous pouvez retirer le microcontrôleur de votre carte Arduino Uno et l'insérer dans votre plaque d'essai, où vous pourrez alors le relier à des composants traditionnels. Cependant, en procédant ainsi, vous n'avez aucune possibilité de téléverser un programme dans le microcontrôleur et vous devrez ajouter un oscillateur à cristal pour qu'il fonctionne à la même vitesse que sur la carte Arduino Uno.

- Vous pouvez installer votre thermistance et la résistance sur une plaque d'essai, puis acheminer la tension apparaissant aux bornes de la thermistance à la carte Arduino Uno avec un fil de test, comme vous l'avez déjà fait pour la tension d'alimentation. C'est une solution peu élégante, mais c'est la plus courante. Quand vous aurez terminé votre programme et qu'il sera téléversé de façon permanente dans le microcontrôleur, vous pourrez alors le déplacer en dehors de la carte Arduino Uno, pour une utilisation plus pratique.

Le plan de réalisation de la plaque de montage est représenté sur la figure 5-89. La figure 5-90 montre une photo de l'ensemble. Pour une fois, les fils avec un petit connecteur à chaque extrémité sont utiles, mais je me méfie toujours d'eux.

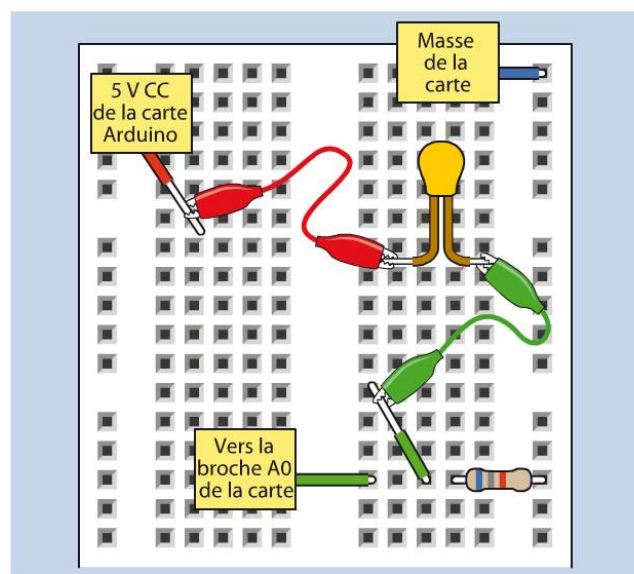


Figure 5-89. Câblage du circuit de la thermistance à l'Arduino.

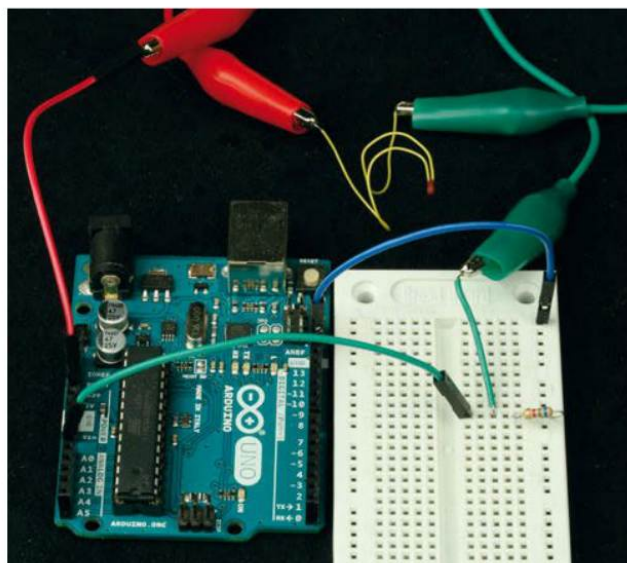


Figure 5-90. Utilisation de fils de pontage pour relier le circuit de la thermistance à la carte Arduino Uno.

Aucune sortie ?

Tout est presque prêt pour la conversion d'une entrée analogique en valeur numérique. Il ne manque plus qu'une sortie !

Il est courant que la carte Arduino Uno soit vendue accompagnée d'un petit afficheur alphanumérique qui vous permet de l'utiliser comme un petit calculateur. Vous pouvez vous procurer ce type d'afficheur, mais cela ajoute une certaine complexité. Comme toujours dans le monde des microcontrôleurs, ce n'est pas une solution clés en main : le microcontrôleur doit être programmé pour envoyer du texte à l'afficheur.

Afin de rester dans la simplicité, la petite LED jaune de la carte Arduino Uno servira d'indicateur. Elle va représenter le chauffage d'une pièce qui se déclenche si la température est basse et s'arrête quand elle augmente suffisamment.

Hystérésis

Supposons que nous voulions chauffer une serre en maintenant une température constante de 30 °C et que la tension de sortie du pont diviseur soit de 2,3 V à cette température. En consultant la courbe de la figure 5-88, vous verrez que le CAN de la carte convertira cette tension en une valeur numérique approximative de 470.

Nous avons donc un seuil à 470. Si la valeur numérique convertie diminue à 469, nous devons allumer le chauffage / allumer la LED jaune. Si la valeur monte à 471, le chauffage doit être arrêté.

Cela a-t-il un sens ? Une petite augmentation de la température évaluée par la thermistance va allumer la LED et une légère diminution va l'éteindre. Le système variera sans cesse d'état.

Un vrai thermostat ne répond pas à une variation si faible de température, qui pourrait être provoquée par l'ouverture ou la fermeture d'une porte. Quand il est enclenché, il le reste jusqu'à ce que la température repasse un peu au-dessus du seuil de déclenchement. De même, quand il est au repos, il le reste jusqu'à ce que la température descende au-dessous du seuil de déclenchement.

Ce comportement s'appelle l'*hystérésis* (j'en parle en détail dans *L'électronique en pratique 2*).

Comment insérer une hystérésis dans le programme d'un microcontrôleur ? Pour cela, nous utilisons des valeurs plus éloignées que 469 et 471. Le comportement du programme sera le suivant :

- Si la LED est allumée, ne changeons rien jusqu'à ce que la valeur numérique dépasse 480. Elle peut alors être éteinte.
- Si la LED est éteinte, attendons que la valeur descende en dessous de 460 pour l'allumer.

C'est assez facile à programmer, voyez plutôt.

```
// Simulation d'un thermostat de chauffage
// par Charles Platt
// Adaptation française Jean Boyer

int tempDigitale=0;
// tempDigitale est une variable qui mémorise la
// valeur numérique correspondant à la température.

int etatLED=0;
// Sera égal à 0 si la LED est éteinte.
// Sera égal à 1 si elle est allumée.

void setup()
{
  pinMode(13, OUTPUT);
  // La LED de la carte indique l'état de la sortie

  // Il est inutile de préciser le mode de fonctionnement
  // de la broche analogique qui est toujours une entrée.
}
```

```
void loop()
{
  tempDigitale=analogRead(0);
  // La tension de la thermistance est lue par
  // l'entrée analogique A0.

  if (etatLED==1 && tempDigitale>480)
  {
    etatLED=0;
    digitalWrite (13, LOW);
  }

  if (etatLED==0 && tempDigitale<460)
  {
    etatLED=1;
    digitalWrite (13, HIGH);
  }
  delay(100);
}
```

Le programme introduit quelques nouveaux concepts. Pour commencer, entrez-le dans l'EDI Arduino. Vous n'êtes pas obligé de saisir toutes les lignes de commentaires, qui ont été ajoutées pour vous fournir des explications.

Vérifiez/compilez votre programme et corrigez toute erreur de syntaxe (vous aurez probablement oublié un point-virgule par-ci par-là, c'est l'erreur la plus fréquente).

Connectez votre carte Arduino Uno, téléversez le programme et, si la température de votre thermistance est inférieure à 30 °C, la LED jaune devrait s'allumer.

Prenez la thermistance entre le pouce et l'index pour la réchauffer, comme si la température de la pièce augmentait. Après quelques secondes, la LED devrait s'éteindre. Laissez la thermistance refroidir, la LED reste allumée en raison de l'hystérésis du système, qui lui impose d'attendre que la température soit suffisamment faible. La LED devrait finalement se rallumer. Bravo, ça fonctionne !

Le programme ligne par ligne

Ce programme introduit le concept de variable. Une variable occupe un espace de la mémoire du microcontrôleur dans lequel une valeur digitale sera stockée. Vous pouvez comparer cela à une « boîte à souvenirs ». À l'extérieur de la boîte, il y a une étiquette qui indique le nom de la variable ; à l'intérieur se trouve sa valeur.

```
int tempDigitale=0 ;
```

Cette ligne indique que l'on crée une variable nommée `tempDigitale`. Il s'agit d'un *entier* (integer ou `int` en anglais, c'est-à-dire valeur entière) qui est initialisé à zéro.

```
int etatLED=0 ;
```

Cette ligne signifie que je crée une autre variable entière qui va garder en mémoire l'état, allumé ou éteint, de la LED de la carte. Il n'existe aucun moyen simple pour que la carte repère si la LED est éteinte ou allumée, je dois donc mémoriser son état.

La fonction `setup` du programme (initialisation) se limite à indiquer au microcontrôleur que la broche 13 est une sortie. Il est inutile de préciser le mode de fonctionnement de la broche A0 car les broches analogiques sont des entrées par défaut.

Passons maintenant au cœur du programme : la fonction `loop` (boucle répétitive). La première instruction est `analogRead`, qui demande au microcontrôleur de lire la valeur d'une entrée analogique. J'ai entré le paramètre 0, qui signifie *broche A0*. C'est à cette broche que la tension issue de la plaque de montage est fournie.

Quand la valeur générée par le CAN est lue, elle est mémorisée dans la variable nommée `tempDigitale`.

Maintenant que `tempDigitale` contient une valeur, je peux m'en servir. En premier, je vais dire que *si* (`if`) le chauffage fonctionne / la LED est allumée *et si* la valeur représentant la température est plus grande que 480, alors je dois arrêter le chauffage. Cette condition s'exprime comme suit :

```
if (etatLED==1 && tempDigitale>480)
```

Le double signe `==` signifie « faire la comparaison afin de déterminer si les deux valeurs sont identiques ». Un signe égal unique signifierait « affecter cette valeur à une variable », ce qui est une action différente.

Le double signe `&&` est l'opérateur logique ET (AND), qui fonctionne comme si l'on utilisait une porte ET (AND). Au lieu de câbler un circuit intégré, on entre une ligne de code.

Le symbole `>` signifie « est plus grand que ».

La condition de test de l'instruction `if` est contenue entre parenthèses. Si la condition entre parenthèses est VRAIE (TRUE), le microcontrôleur exécute les instructions suivantes, encadrées par deux accolades. Dans notre cas, `etatLED=0` mémorise le fait que la LED vient d'être éteinte et `digitalWrite (13, LOW)` l'éteint effectivement.

L'instruction `if` suivante est très similaire. Elle vérifie que la LED est éteinte et que la température est descendue suffisamment bas pour provoquer la mise en route du chauffage. La LED est alors allumée.

Le programme se termine par une pause de 100 ms car il est inutile de vérifier la température plus fréquemment.

Et c'est tout !

Détails complémentaires

Je viens de vous montrer quelques éléments syntaxiques du langage, comme le mot-clé `if` et les opérateurs `==` et `&&`, mais je ne vous ai pas fourni la liste complète de la syntaxe du langage C, qui dépasse le cadre de ce livre. Vous la trouverez sur Internet, à l'adresse suivante :

<http://playground.arduino.cc/French/Reference>

Notez quelques points importants relatifs à ce programme :

- Les lignes sont décalées à gauche (indentées), dans le but de clarifier la structure logique du programme. Vous êtes libre d'ajouter autant d'espaces que vous le souhaitez, puisque le compilateur ignore les espaces additionnels.
- L'EDI pointe les erreurs de frappe par des couleurs, pour vous aider à les corriger.
- Pour créer un nom de variable, vous pouvez utiliser une combinaison de lettres et de chiffres, ainsi que le signe de soulignement `_` (*underscore*), mais ce nom doit être différent d'un mot-clé ayant déjà une signification en langage C. Par exemple, vous ne pouvez pas créer une variable nommée `void`.
- Le nom d'une variable doit toujours commencer par une lettre (majuscule ou minuscule) et ne pas utiliser de lettre accentuée.
- Chaque variable doit être déclarée au début du programme afin que le compilateur sache ce dont il s'agit.
- Une valeur entière (déclarée par le mot-clé `int`) peut contenir une valeur comprise entre -32768 et +32767. Le compilateur C du microcontrôleur Arduino reconnaît d'autres types de variables, ayant une plage de valeurs plus importante ou capables de stocker des valeurs décimales (voir expérience suivante).

Pour consulter le guide de référence du langage C, rendez-vous sur le site d'Arduino, cliquez sur l'onglet Learning et choisissez Reference dans le menu déroulant. Vous pouvez aussi consulter le site en français : <http://playground.arduino.cc/French/Reference>. Vous pouvez également utiliser le menu Aide de l'EDI Arduino et choisir le sous-menu Référence.

Améliorations

Le programme fait correctement ce que l'on attend de lui, mais il est très limité. L'utilisation de valeurs fixes pour les écarts de température est la contrainte la plus importante. C'est comme si un thermostat était maintenu à une seule température par de la colle et qu'il ne pouvait jamais être réglé. Comment améliorer le programme, afin qu'un utilisateur puisse modifier le seuil de la température de déclenchement du chauffage ?

Il faudrait ajouter un potentiomètre. Les bornes extrêmes du potentiomètre seraient reliées aux deux pôles de l'alimentation et son curseur à une autre entrée analogique du microcontrôleur. De cette façon, le potentiomètre se comporterait comme un pont diviseur et fournirait une tension comprise entre 0 et 5 V.

Il faudrait ensuite ajouter une autre procédure dans la fonction loop, afin que le microcontrôleur lise la valeur retournée par le potentiomètre et la traite.

Le résultat serait un nombre compris entre 0 et 1 023. Il devrait être ensuite converti en un nombre en accord avec la gamme de températures retenue et compatible avec les valeurs de la variable tempDigitale. Cette valeur serait stockée dans une nouvelle variable appelée tempUtilisateur. Il suffirait alors de regarder si la valeur de la température relevée par la thermistance est supérieure ou inférieure à tempUtilisateur.

Voyons comment convertir la mesure du potentiomètre en une valeur compatible. Si la mesure de la thermistance varie entre 430 et 512, comme nous l'avons estimé précédemment, sa valeur est 471 plus ou moins 41. Le potentiomètre a une valeur de 512 plus ou moins 512. On peut donc convertir de la façon suivante :

```
tempUtilisateur=471+((valeurPot-512)*0.08)
```

valeurPot est la valeur lue à l'entrée utilisée par le potentiomètre. Le signe * représente la multiplication dans le langage C. Cette valeur convertie serait suffisamment proche.

Il est vrai que les formules mathématiques sont très souvent utilisées en programmation. Il est difficile d'y échapper, mais cela ne concerne le plus souvent que les opérations simples.

Dans la version améliorée du programme, je dois toujours tenir compte de l'hystérésis. La première instruction if doit donc être modifiée comme suit :

```
if (etatLED==1 && tempDigitale>(tempUtilisateur+10))
    alors, éteindre la LED, mais
```

```
if (etatLED==0 && tempDigitale<(tempUtilisateur-10))
    allumer la LED
```

Cela définit une hystérésis de plus ou moins 10 par rapport aux valeurs délivrées par le CAN.

Avant de pouvoir l'utiliser, rappelez-vous qu'il faut déclarer chaque variable dans le corps du programme.

Expérience 34 : des dés plus sophistiqués

Dans cette dernière expérience, je vais revenir sur l'expérience 24, dans laquelle j'ai utilisé des circuits intégrés logiques pour générer l'affichage des points d'un dé. Au lieu de circuits intégrés logiques, nous allons maintenant utiliser des instructions if avec des opérateurs logiques, dans le programme d'un microcontrôleur. Il est possible de remplacer plusieurs composants traditionnels par une douzaine de lignes de code et nous n'aurons besoin que d'un microcontrôleur pour remplacer le temporisateur 555, le compteur et trois circuits intégrés logiques. C'est un bel exemple d'utilisation d'un microcontrôleur pour une application. Nous aurons toutefois toujours besoin des LED et de leurs résistances de protection en série.

De quoi avez-vous besoin ?

- 1 plaque d'essai, des fils de liaison, une pince coupante, une pince à dénuder, des fils de test et un multimètre
- 7 LED génériques
- 7 résistances de protection de 330 Ω
- 1 carte Arduino Uno
- 1 ordinateur de bureau ou portable avec un port USB disponible
- 1 câble USB muni d'une fiche de type A à l'une de ses extrémités et d'une fiche B à l'autre

Limites de l'apprentissage par l'expérience

L'apprentissage par l'expérience convient parfaitement à la découverte d'un composant électronique. Vous pouvez le connecter sur une plaque de montage, mettre sous tension et constater ce qui se passe. Même dans le cas où vous concevez un circuit, il est possible de progresser par essais et corrections successifs.

L'écriture d'un programme est un sujet différent. Vous devez être discipliné et organisé, sinon votre programme ne sera pas fiable. Vous devez donc établir un plan de travail pour éviter de perdre beaucoup de temps en repartant de zéro.

Pour ce dernier projet, je vais commencer par décrire la procédure pour établir un plan de travail. Vous n'aurez pas le plaisir immédiat d'assembler quelques composants pour voir ce qui se passe, mais si je n'explique pas le processus de développement d'un logiciel, vous aurez l'impression que c'est simple.

Randomisation (générer au hasard)

Quel est le rôle exact de ce programme ? La question est importante parce que, si vous ne définissez pas clairement vos objectifs, le microcontrôleur ne pourra pas le faire pour vous. C'est un processus proche de celui décrit au cours de l'expérience 15, quand vous avez dû rédiger le « cahier des charges » du système d'alarme anti-intrusion ; pour utiliser un microcontrôleur, il est nécessaire d'aller plus loin dans le détail.

L'action principale souhaitée est très simple. Le programme doit choisir un nombre au hasard et l'afficher par des LED disposées comme les points d'un dé.

Le choix d'un nombre au hasard est fondamental dans ce programme. C'est pourquoi vous devez bien vous renseigner à ce sujet. Les explications fournies sur le site Arduino (<http://playground.arduino.cc/French/Reference>) ne sont pas aussi compréhensibles qu'on pourrait le souhaiter, mais c'est une aide utile malgré tout.

Sur la page affichée se trouve une rubrique Nombres randomisés (hasard). Vous y trouverez une fonction spécialement conçue pour l'Arduino, appelée `random()`.

Ce n'est pas surprenant, la plupart des langages de programmation de haut niveau possèdent un générateur de nombres aléatoires, qui fonctionne en utilisant une astuce mathématique générant une suite très importante de nombres imprévisibles pour un observateur. Le seul problème est que la séquence commence toujours de la même façon, à chaque fois que le programme s'exécute.

Pour que cette séquence commence par une valeur différente, il existe une autre fonction appelée `randomSeed()` qui initialise le générateur de nombres aléatoires en interrogeant une broche analogique d'entrée, inutilisée pour connaître son état. Comme je l'ai déjà mentionné, une broche flottante capte une multitude de radiations

électromagnétiques environnantes ; son état est donc imprévisible. C'est pourquoi `randomSeed()` peut être considérée comme aléatoire. C'est un concept intéressant, mais il faudra se rappeler de ne pas utiliser la broche interrogée par cette fonction.

Laissons de côté ce problème concernant la génération d'un nombre aléatoire et utilisons la fonction `random()` pour obtenir un nombre aléatoire dans le programme de simulation de dés.

Le joueur doit appuyer sur un bouton-poussoir pour que la configuration aléatoire de points soit affichée. C'est tout ! Pour relancer les dés, il suffit d'appuyer à nouveau sur le bouton-poussoir et une autre valeur choisie arbitrairement sera affichée.

Cela semble parfait, mais je ne suis pas sûr que ce soit très intéressant, pas plus que plausible. Les joueurs pourraient se demander si le nombre affiché est réellement choisi aléatoirement. Le problème vient du fait qu'ils n'ont pas le contrôle de ce qui se passe.

Si on se rappelle la version en composants classiques, l'affichage rapide des nombres et l'action du joueur devant arrêter la séquence de façon aléatoire étaient très appréciables.

Le programme devrait simuler ce fonctionnement, au lieu d'utiliser un nombre choisi au hasard par la fonction `random()`. On peut compter de 1 à 6 de façon très rapide et répétitive, comme le circuit intégré compteur de la version classique du dé électronique.

Toutefois, quand le programme compte de 1 à 6 et se répète, il lui faut quelques microsecondes pour revenir au départ de la boucle `loop()`. C'est la raison pour laquelle le nombre 6 sera affiché légèrement plus longtemps que les autres.

On pourrait alors combiner les deux principes, par exemple utiliser le générateur de nombres aléatoires pour créer une série de nombres et les visualiser ensuite très rapidement, jusqu'à ce que le joueur appuie sur le bouton-poussoir pour arrêter l'affichage à un moment arbitraire. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'avoir un autre bouton pour redémarrer l'affichage rapide des nombres ; un seul bouton suffit. On appuie pour stopper, on appuie une nouvelle fois pour recommencer.

Passons à l'étape suivante : choisir les instructions qui vont permettre au microcontrôleur de fonctionner ainsi.

Pseudocode

J'aime écrire du *pseudocode*, c'est-à-dire une succession de termes du langage courant qui seront ensuite convertis dans le langage de programmation du microcontrôleur. Voici mon pseudocode pour le programme que j'appelle les dés magiques. Rappelez-vous que ces ordres seront exécutés très rapidement, les nombres seront donc invisibles.

Boucle principale :

1. Choisir un nombre aléatoire.
2. Le convertir en une configuration de points d'un dé et allumer les LED correspondantes.
3. Vérifier si le bouton a été enfoncé.
4. Si le bouton n'est pas enfoncé, revenir à l'étape 1 et tirer un autre nombre aléatoire, afin de répéter rapidement la séquence. Sinon...
5. Figé l'affichage.
6. Attendre que le joueur appuie à nouveau sur le bouton-poussoir et revenir alors à l'étape 1 et recommencer.

Voyez-vous un problème dans cette séquence ? Essayez de vous mettre à la place du microcontrôleur. Si vous receviez de tels ordres, auriez-vous tous les éléments pour que toutes les actions soient accomplies ?

En réalité, non, car des ordres manquent. L'étape 2 dit : « allumer les LED appropriées », mais il n'existe aucune instruction qui les éteint !

Il est important de toujours vous rappeler ceci : l'ordinateur ne fait *que* ce que vous lui dites de faire.

Si vous souhaitez que les LED allumées soient éteintes, car un autre nombre doit être affiché, vous devez prévoir une instruction pour le faire.

L'affichage doit s'éteindre immédiatement après qu'un nouveau nombre a été choisi et affiché. Le meilleur endroit pour supprimer l'affichage est donc au début de la fonction `loop()`. Je vais l'inclure en tant qu'étape 0.

0. Éteindre toutes les LED.

Réfléchissons. Selon le nombre qui était affiché à l'issue du cycle précédent, certaines LED de la configuration étaient allumées et d'autres éteintes. Si nous les éteignons toutes, nous allons le faire pour celles qui étaient déjà éteintes. Le microcontrôleur ne s'en souciera guère,

mais il va passer du temps à exécuter des instructions inutiles. Il serait plus efficace de n'éteindre que les LED qui étaient précédemment allumées et d'ignorer les autres.

Ceci rendrait le programme plus complexe et ce n'est pas réellement nécessaire. Aux débuts de l'informatique, il était indispensable d'*optimiser* les programmes afin d'économiser les cycles du processeur, mais aujourd'hui, même un microcontrôleur est suffisamment rapide pour que l'on ne se soucie plus d'éteindre deux ou trois LED qui étaient déjà éteintes. Je vais donc écrire une fonction qui éteint toutes les LED, quel que soit leur état.

Données d'entrée d'un bouton-poussoir

Que manque-t-il dans ma liste de pseudocode ?

Il reste un problème de bouton-poussoir.

Le cycle de l'affichage passe très rapidement d'un nombre au suivant. Le joueur doit appuyer sur le bouton pour l'arrêter. L'affichage est alors figé, afin que le nombre choisi soit visible. Durant l'étape 6, le microcontrôleur attend que le joueur appuie à nouveau sur le bouton-poussoir, afin de démarrer un nouveau cycle d'affichage rapide.

C'est parfait, mais comment le joueur pourrait-il appuyer à nouveau sur le bouton s'il ne l'a pas d'abord relâché ?

Avec le pseudocode en l'état, voici ce que le microcontrôleur va exécuter très rapidement :

- le programme ordonne au microcontrôleur de vérifier l'état du bouton ;
- le microcontrôleur détecte l'appui sur le bouton ;
- l'affichage se fige. Le microcontrôleur attend que le bouton soit à nouveau enfoncé ;
- il s'aperçoit que le bouton est toujours pressé, car le joueur n'a pas pris la précaution de le relâcher ;
- le microcontrôleur redémarre donc le cycle de l'affichage rapide.

En conséquence, l'affichage ne sera figé qu'un très court instant.

Voici la solution à ce problème : une étape supplémentaire doit être ajoutée à la séquence.

- 5a. Attendre que le joueur relâche le bouton.

Cela évitera que le microcontrôleur ne continue son cycle et affiche de nouvelles valeurs, en attendant que le joueur soit prêt.

Nous n'avons pas fini. Si vous entendez dire qu'il suffit d'écrire quelques instructions et de voir ce qui se passe, ce sera rarement le cas. Il subsiste encore un problème au sujet du bouton. L'étape 6 dit : « attendre que le bouton soit à nouveau enfoncé pour redémarrer l'affichage rapide des nombres ». D'accord ; le joueur appuie sur le bouton, l'affichage repart, mais le microcontrôleur est si rapide qu'il éteint les LED, affiche une nouvelle valeur et vérifie à nouveau l'état du bouton avant que le joueur n'ait eu le temps de le relâcher. En conséquence, quand le microcontrôleur atteint l'étape 4, il constate que le bouton est toujours enfoncé et il fige à nouveau l'affichage.

Je pourrais peut-être ajouter une étape 7 ordonnant au microcontrôleur d'attendre que le bouton soit relâché pour reprendre l'affichage rapide.

Ce n'est pas intuitif. Je pense que personne ne comprendrait qu'il faille appuyer sur un bouton puis le relâcher avant que l'affichage rapide ne reprenne. On pourrait dire « il faut le faire car le programme le requiert », mais ce serait une *très mauvaise façon de penser*.

Un programme doit faire ce que l'utilisateur souhaite. On ne doit jamais forcer l'utilisateur à accomplir une action qui satisfasse le programme.

Dans tous les cas, l'idée d'attendre que le bouton soit relâché avant que l'affichage rapide ne reprenne ne fonctionne toujours pas. Il y a en effet un autre problème : les rebonds des contacts. Cela se produit quand le bouton est appuyé et quand il est relâché. En conséquence, si quelqu'un relâche le bouton, le processus repart et le programme vérifie à nouveau le bouton quelques millisecondes plus tard. Les contacts étant toujours en vibration, ils pourraient apparaître ouverts ou fermés de façon imprévisible.

C'est le genre de problème que l'on rencontre quand un microcontrôleur interagit avec son environnement. Le microcontrôleur a besoin que tout soit précis et stable, mais son environnement est imprécis et surtout instable.

On pourrait envisager de revenir à deux boutons : l'un pour démarrer l'affichage rapide, l'autre pour l'arrêter. De cette façon, aussitôt que le bouton Départ est enfoncé, le microcontrôleur peut ignorer son état et les rebonds de ses contacts, et se contenter d'attendre que le bouton Stop soit enfoncé.

Du point de vue du joueur, il serait préférable de n'avoir qu'un seul bouton-poussoir.

Je vais à nouveau énoncer le plus clairement possible ce que je souhaite que le programme fasse. « Je veux que le programme recommence la séquence rapide aussitôt que le bouton est enfoncé pour la seconde fois, mais après, le programme doit ignorer le bouton jusqu'à ce qu'il soit relâché et que les rebonds aient pris fin. »

Pourquoi ne pas simplement verrouiller le bouton pendant 1 s ou 2 ? L'affichage rapide devrait durer pendant un certain temps avant que le joueur ne puisse l'arrêter. En parcourant autant de valeurs, l'affichage paraîtrait plus aléatoire.

Supposons que je verrouille le bouton pendant 2 s, après le début de l'affichage rapide. L'étape 4 devrait être réécrite comme suit :

4. Si le bouton n'a pas été enfoncé OU si l'affichage rapide a commencé il y a moins de deux secondes, revenir au début et tirer un autre nombre aléatoire. Sinon...

Vous remarquerez l'apparition du mot OU. Ces opérateurs booléens sont vraiment incontournables.

L'horloge du système

Maintenant que tous les problèmes relatifs au bouton-poussoir sont résolus, je dois mesurer un intervalle de 2 s.

Le langage C dispose de la fonction `millis()`, qui mesure le temps en millisecondes. Elle fonctionne comme une horloge, repartant de zéro à chaque redémarrage du programme. Cette fonction est capable d'atteindre une valeur si élevée qu'il lui faudrait environ 50 jours pour repartir à zéro, après avoir atteint sa limite. Cela devrait suffire.

Une petite faille subsiste. L'Arduino ne permet pas à un programme de remettre cette horloge à zéro. Comme un chronomètre, l'horloge commence son décompte au démarrage du programme, mais elle ne peut pas être stoppée.

Je vais tout simplement utiliser l'horloge du système comme la pendule de ma cuisine. Quand je veux faire cuire un œuf, je note mentalement l'heure à laquelle l'eau commence à bouillir, disons par exemple 17 h 02 et j'ajoute le temps de cuisson nécessaire, disons 7 minutes. Cela me donne l'heure à laquelle je devrai retirer l'œuf de la casserole, 17 h 09.

Ce que je fais mentalement consiste à vérifier le temps qui s'écoule : lorsqu'on atteint 17 h 09, mon œuf est cuit.

Pour faire de même dans le programme de simulation d'un dé, il suffit de créer une nouvelle variable qui va se comporter comme ma mémoire, à l'instant où l'eau commençait à bouillir. Immédiatement avant que l'affichage rapide ne commence, je vais mémoriser la valeur de l'horloge plus deux secondes. Je vais alors demander au programme : « L'horloge du système a-t-elle atteint la valeur de ma variable ? », jusqu'à ce que cela se produise.

Je vais nommer cette variable `ignore`, car elle va indiquer à quel moment le futur programme devra cesser d'ignorer le bouton. L'étape 4 demandera au microcontrôleur si l'horloge du système a dépassé la valeur de la variable `ignore`, auquel cas le programme devra à nouveau vérifier l'état du bouton. On ne peut pas réinitialiser l'horloge du système, mais on peut réinitialiser la variable `ignore` à la valeur retournée par `millis() + 2 s`, à chaque fois que commence un cycle d'affichage rapide.

Pseudocode finalisé

En prenant en compte toutes ces considérations, voici la version révisée de la séquence d'événements du programme :

Avant le début de la boucle `loop()`, définir le mode des broches d'entrée et sortie, puis initialiser la variable `ignore` à la valeur de l'horloge plus deux secondes.

0. Éteindre toutes les LED.
1. Choisir un nombre aléatoire.
2. Le convertir en configuration de points du dé et allumer les LED appropriées.
3. Vérifier si le bouton a été enfoncé.
4. Vérifier si l'horloge du système a atteint la valeur de la variable `ignore`.
- 4a. Si le bouton n'a pas été enfoncé OU si l'horloge du système n'a pas atteint la valeur de la variable `ignore`, retourner à l'étape 0. Sinon...
5. Figurer l'affichage.
- 5a. Attendre que le joueur relâche le bouton.
6. Attendre aussi longtemps que nécessaire que le joueur appuie une fois de plus sur le bouton-poussoir, afin de redémarrer l'affichage.

7. Réinitialiser la variable `ignore` à la valeur de l'horloge du système plus deux secondes.

Retourner à l'étape 0.

Mise en œuvre matérielle

La figure 5-91 montre, sur une plaque de montage, le câblage des sept LED qui se chargent de l'affichage des points du dé. Le principe est le même que celui de la figure 4-146, sauf que chaque sortie de la carte Arduino Uno peut délivrer 40 mA ; il n'est donc plus nécessaire de piloter les LED par deux, reliées en série. Une seule broche de sortie peut facilement alimenter deux LED reliées en parallèle, une résistance de 330 Ω étant suffisante pour chacune des LED génériques.

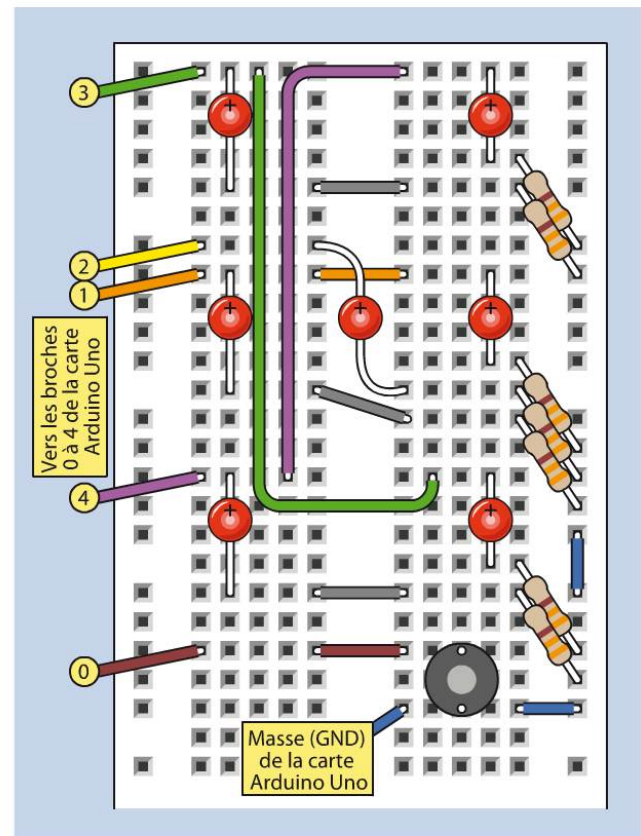


Figure 5-91. Câblage sur une platine d'essai des sept LED utilisées pour l'affichage des points d'un dé.

Les numéros des connexions sont identiques à ceux de la figure 4-146. Ils n'ont aucun lien avec la valeur du dé. Ce sont des valeurs arbitraires qui servent à identifier chaque fil : je relie les fils 1 à 4 aux broches des sorties digitales 1 à 4 de la carte Arduino Uno.

J'utilise en entrée la broche digitale 0 de la carte Arduino Uno, pour vérifier l'état du bouton-poussoir. Il faut toutefois savoir que l'Arduino Uno utilise les broches 0 et 1 pour la réception des données par l'interface USB. Si vous rencontrez des difficultés pour téléverser votre programme, déconnectez temporairement la connexion de la broche 0.

Ne reliez pas encore le fil de masse de la plaque de montage à la carte Arduino Uno. Il est plus prudent de téléverser d'abord le programme, car il va indiquer au microcontrôleur les broches d'entrée et de sortie. Un précédent programme pourrait les avoir configurées différemment et, dès que la carte Arduino Uno est alimentée, elle exécute le programme qu'elle a en mémoire. Cela pourrait être dangereux pour ses sorties.

Vous devez être prudent et ne jamais appliquer une tension à une broche configurée en sortie.

Le programme

Vous pouvez maintenant saisir le programme suivant dans la fenêtre de l'EDI.

```
// Les dés magiques
// par Charles Platt
// Adaptation française Jean Boyer

int valeur=0;
int brocheSortie=0;
long ignore=0;

void setup()
{
  pinMode(0, INPUT_PULLUP);
  pinMode(1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  ignore=2000+millis();
}

void loop()
{
  // Commençons par éteindre les LED
  for (brocheSortie=1; brocheSortie<5;
    brocheSortie++);
    { digitalWrite(brocheSortie, LOW); }

  // Tirons un nombre au hasard compris entre
  1 et 6.
  valeur=random(1,7);
```

```
// Affichons la bonne combinaison des points.
if (valeur==6)
  { digitalWrite (1, HIGH); } // Deux points latéraux
  // au centre
if (valeur==1 || valeur==3 || valeur==5)
  { digitalWrite (2, HIGH); } // Point central
if (valeur>3)
  { digitalWrite (3, HIGH); } // Deux points de
  la diagonale
  // en haut à gauche
if (valeur>1)
  { digitalWrite (4, HIGH); } // Deux points de
  la diagonale
  // en haut à droite
  delay (20); // Ajout d'un délai rendant
  l'affichage
  // plus confortable
  // Après que deux secondes se sont écoulées,
  // cesser d'ignorer le bouton.
  // Si le bouton est enfoncé, appeler la fonction
  // verifBouton.
  if (millis()>ignore && digitalRead(0)==LOW)
    { verifBouton(); }
}

// Cette fonction attend que le bouton soit relâché,
// puis
// qu'il soit à nouveau enfoncé pour commencer le
// cycle suivant.
void verifBouton()
{
  delay(50); // Attente de la
  fin des rebonds
  // quand le bouton
  est enfoncé.

  while (digitalRead(0)==LOW); // Ne rien faire
  tant que le
  { } // bouton est en-
  foncé.

  delay(50); // Attente de la
  fin des rebonds
  // quand le bouton
  est relâché.

  while (digitalRead(0)==HIGH) // Ne rien faire
  tant que le
  { } // bouton est relâ-
  ché.

  ignore=2000+millis(); // Réinitialisation
  de la
  // variable ignore.
  // Retour à la
  }
  boucle principale
```

En entrant votre programme, vous rencontrerez dans la seconde instruction if un caractère particulier que vous n'avez pas encore vu et peut-être ne l'avez-vous d'ailleurs

jamais entré au clavier. Il s'agit d'une barre verticale |, parfois appelée « tube » ou « pipe » en anglais. Sur le clavier français Windows, elle se trouve sur la touche 6 du haut. Pour la saisir, il faut appuyer simultanément sur la touche AltGr et la touche 6. Lorsque vous aurez terminé la saisie, rendez-vous dans le menu Croquis>Vérifier/Compiler de l'EDI afin de détecter une éventuelle erreur de frappe.

Certains messages sont parfois difficiles à interpréter, ils se réfèrent aux numéros des lignes de code. Par défaut, les numéros sont indiqués en début de chaque ligne. Si ce n'est pas le cas, rendez-vous dans le menu Fichier>Préférences et cochez la case Afficher les numéros de ligne, puis revenez à la fenêtre principale à l'aide du bouton OK.

La compréhension des messages d'erreur est parfois délicate, mais voici une liste des causes les plus fréquentes.

- Oubli d'un point-virgule à la fin d'une instruction.
- Oubli d'une accolade de fermeture. Rappelez-vous que les accolades vont par paire.
- Confusion majuscules/minuscules. Les instructions comportent souvent un mélange de lettres minuscules et majuscules, comme `pinMode`, que vous pourriez avoir saisi tout en minuscules. L'EDI affiche en rouge les commandes quand elles sont correctement orthographiées. Si une commande s'affiche en noir, elle comporte une erreur de frappe.
- Utilisation de caractères accentués ou interdits dans les noms des variables ou des fonctions que vous avez créées.
- Oubli des parenthèses à la suite du nom d'une fonction comme `void loop()`.
- Oubli d'un signe `=` dans les instructions qui en exigent deux. Rappelez-vous que `=` signifie « affecter la valeur », alors que `==` signifie « vérifier si deux valeurs sont égales ».
- Oubli d'un signe `|` ou `&` quand deux sont nécessaires.

Une fois que la compilation s'effectuera sans aucun message d'erreur, téléversez le programme. Reliez ensuite le fil de masse de la plaque de montage à la carte Arduino Uno. Les LED devraient commencer à clignoter. Attendez quelques secondes et appuyez sur le bouton ; le clignotement cesse et un chiffre choisi au hasard s'affiche sur les LED. Appuyez à nouveau sur le bouton et l'affichage rapide recommence. Maintenez l'appui sur le

bouton et, après la période de 2 s durant laquelle l'état du bouton est ignoré, l'affichage se fige à nouveau.

Le pseudocode a donc bien été implémenté dans la carte Arduino Uno.

Étudions maintenant le fonctionnement du programme

Des entiers courts ou longs

Le programme contient quelques mots-clés que vous n'avez pas encore vus, ainsi qu'un nouveau concept très important.

Un des mots nouveaux est `long`. Jusqu'à présent, vous avez utilisé `int` (signifiant « nombre entier »), avant chaque nom de variable. La valeur d'un entier `int` est comprise entre -32 768 et +32 767. Quand il est nécessaire de mémoriser une valeur plus importante, un entier `long` doit être utilisé, capable de stocker une valeur comprise entre -2 147 483 648 et +2 147 483 647.

Pourquoi ne pas utiliser des entiers `long` dans tous les cas ? Nous n'aurions plus à nous soucier des limites d'un entier `int`. C'est exact, mais le microcontrôleur prend deux fois plus de temps (voire davantage) pour traiter un entier `long`, qui occupe deux fois plus de place en mémoire. Et un microcontrôleur Atmel n'a pas beaucoup de mémoire disponible.

La fonction `millis()` est utilisée pour retourner une valeur de temps exprimée en millisecondes. Si nous ne pouvons compter que jusqu'à 32 767, le temps sera limité à la moitié d'une minute. Nous aurons probablement besoin de valeurs supérieures ; c'est pourquoi la fonction retourne un entier `long` (voir la référence du langage).

Quand j'ai créé la variable `ignore`, afin de mémoriser la valeur de l'horloge du système, j'ai dû la définir de façon à ce qu'elle soit compatible avec la valeur de l'horloge retournée par la fonction `millis()`, c'est-à-dire un entier déclaré avec le mot-clé `long`.

Si on essaie de stocker dans une variable un nombre entier dont la valeur dépasse les limites, le programme fonctionnera de manière imprévisible. C'est à vous de vous assurer que cela ne peut pas se produire.

Fonction `setup()` (initialisations)

La partie `setup` du programme est assez compréhensible. La fonction `pinMode()` est facile à comprendre. La première comporte le paramètre `INPUT_PULLUP`, qui est

très utile : il met en œuvre une résistance de tirage intégrée au microcontrôleur, ce qui vous évite d'en ajouter une. Gardez cependant à l'esprit qu'il s'agit d'une *résistance de tirage* (vers la tension +5 V), et non d'une *résistance de maintien* (au potentiel de la masse). Le niveau d'entrée de la broche est normalement haut ; quand un bouton est utilisé, celui-ci doit relier la broche à la masse. Rappelez-vous :

- Quand le bouton est enfoncé, la fonction `digitalRead()` retourne la valeur LOW.
- Quand le bouton est relâché, la fonction `digitalRead()` retourne la valeur HIGH.

La boucle for

Au début de la fonction `void loop()`, il y a une boucle d'un type différent, qui commence par le mot-clé `for`. C'est une façon très pratique de demander au microcontrôleur de compter une série de nombres, chaque valeur étant stockée dans une variable et la précédente étant perdue. La syntaxe est la suivante :

- Le mot-clé `for` est suivi de trois paramètres placés entre parenthèses.
- Chaque paramètre est séparé du suivant par un point-virgule.
- Le premier paramètre est la première valeur qui sera mémorisée dans la variable spécifiée. On parle de valeur de départ. Dans ce programme, la valeur de départ est 1 ; elle est mémorisée dans la variable `brocheSortie`.
- Le second paramètre est la valeur provoquant la sortie de la boucle. Comme la boucle s'arrête à ce point, la valeur finale de la variable sera égale à celle précédant la limite. Dans ce programme, la limite est `<5`, ce qui signifie « inférieur à 5 ». La boucle comptera de 1 à 4, en utilisant la variable `brocheSortie`.
- Le troisième paramètre est la valeur qui est ajoutée à la variable à chaque exécution de la boucle. On parle de l'incrément du compteur de boucle. Dans notre cas, on incrémente de 1 et le langage C permet de spécifier cette opération en utilisant l'opérateur `++`. Ainsi, `brocheSortie++` signifie « ajouter 1 à la variable `brocheSortie` à chaque itération de la boucle ».

Les boucles `for` autorisent toutes sortes de conditions. Elles sont extrêmement flexibles. Consultez le guide de référence du langage C à leur sujet. La boucle utilisée compte

de 1 à 4, mais elle pourrait tout aussi facilement compter de 100 à 400, ou entre n'importe quelles limites, celles-ci dépendant du type de variable `int` ou `long` utilisée.

Durant chaque cycle de la boucle, des actions sont demandées au microcontrôleur. La procédure qu'il exécute est placée entre les accolades qui suivent l'instruction `loop`. Comme toute procédure, elle peut comporter de nombreuses instructions, chacune se terminant par un point-virgule. L'unique instruction de notre procédure écrit un niveau bas (LOW) sur la broche spécifiée par la variable `brocheSortie`. Cette dernière va passer successivement de 1 à 4, alors la boucle `for` va passer la sortie des broches 1 à 4 au niveau bas. Autrement dit, la boucle éteint toutes les LED.

Il y a un moyen plus simple d'y parvenir, à l'aide des quatre instructions suivantes :

```
digitalWrite (1, LOW) ;
digitalWrite (2, LOW) ;
digitalWrite (3, LOW) ;
digitalWrite (4, LOW) ;
```

Cependant, il est important d'apprendre le concept des boucles `for`, car c'est un mécanisme très courant. Et qu'advierait-il pour éteindre 9 LED ou encore si vous voulez faire clignoter une LED 100 fois ? Une boucle `for` est souvent le moyen le plus efficace d'exécuter des actions répétitives.

La fonction `random()`

Après que la boucle `for` a éteint toutes les LED de l'affichage du dé, l'instruction `random()` est appelée pour renvoyer un nombre au hasard, compris entre les limites spécifiées entre les parenthèses. Nous devons obtenir une valeur comprise entre 1 et 6, alors pourquoi avoir défini une plage de 1 à 7 ? En fait, la fonction `random()` génère une valeur fractionnaire, par exemple 1,00000001 à 6,99999999, puis retire les chiffres décimaux. Ainsi, 7 est une limite qui ne sera jamais atteinte ; le nombre généré sera compris entre 1 et 6.

Quelle que soit la valeur du nombre retourné par la fonction `random()`, elle est mémorisée dans la variable `valeur`, indiquant la valeur du dé.

L'instruction `if`

Il faut maintenant examiner la valeur de la variable `valeur` et allumer les LED appropriées.

La première instruction `if` est assez simple. Si la valeur est 6, les six points doivent être allumés, mais c'est la seule combinaison pour que les LED au centre des côtés gauche et droit s'allument, par l'intermédiaire de la broche de sortie 1.

On n'allume pas en même temps les LED des diagonales parce qu'elles doivent être allumées pour d'autres valeurs du dé et qu'il est préférable de limiter le nombre d'instructions `if`. Nous allons voir comment ça marche.

Le `if` suivant utilise le symbole « pipe » dont j'ai parlé. Les deux symboles `||` signifient OU dans le langage C. Donc, l'instruction indique que si nous avons la valeur 1 OU 3 OU 5, la LED du centre doit être allumée, en appliquant un niveau haut sur la broche de sortie 2.

Le troisième `if` indique que si la valeur est supérieure à 3, deux des LED en diagonale doivent être allumées, par l'intermédiaire de la broche de sortie 3, car elles sont nécessaires pour l'affichage des valeurs 4, 5 et 6.

Enfin, le dernier `if` indique que si la valeur est supérieure à 1, les LED de l'autre diagonale doivent être allumées, par l'intermédiaire de la broche 4.

Vérifiez la validité des instructions `if` en regardant les configurations d'affichage de points sur la figure 4-146. Les portes logiques de cette illustration avaient été choisies afin de traiter la valeur de sortie binaire du compteur ; elles sont donc différentes des instructions `if` du programme. En revanche, les LED sont regroupées de la même façon.

Rapidité de l'allumage des LED

À la suite des instructions `if`, j'ai inséré un délai de 20 ms, car cela rend l'affichage plus intéressant. Sans ce délai, les LED clignotent si rapidement qu'elles apparaissent mélangées. En présence du délai, on les voit clignoter, mais assez vite pour qu'il soit impossible d'arrêter l'affichage sur une valeur visible.

Vous pourrez ajuster le délai à une durée supérieure ou inférieure à 20 ms.

Création d'une nouvelle fonction

Abordons maintenant une partie importante. Dans le pseudocode, nous avons parcouru les étapes 3, 4 et 4a :

3. Vérifier si le bouton a été enfoncé.
4. Vérifier si l'horloge du système a atteint la valeur de la variable `ignore`.

4a. Si le bouton n'a pas été enfoncé OU si l'horloge du système n'a pas atteint la valeur de la variable `ignore`, retourner à l'étape 0. Sinon...

Ces étapes peuvent être combinées en une seule instruction `if`. Le pseudocode deviendrait : si (le bouton n'est pas enfoncé OU l'horloge système est inférieure à la valeur `ignore`), retourner à l'étape 0.

Un problème apparaît alors. L'expression « retourner à... » suppose que je dois diriger le microcontrôleur vers une partie spécifique du programme. Cela semble naturel, mais quand le langage C est utilisé pour écrire un programme, il est recommandé de ne pas transférer le contrôle d'une partie du programme à une autre.

En effet, les multiples instructions du type « aller ici » ou « aller là » rendent la compréhension du programme difficile – pas uniquement pour les autres, mais également pour vous, si vous laissez votre programme pendant un long moment.

Le concept du langage C consiste à diviser le programme en blocs séparés qui sont *appelés* quand on le souhaite. Vous pouvez comparer chaque bloc à un fidèle serviteur qui ne sait accomplir qu'une seule action, par exemple faire la vaisselle ou sortir la poubelle. Quand vous voulez que cette tâche soit accomplie, vous n'avez qu'à appeler ce serviteur par son nom.

Les blocs sont des *fonctions*, ce qui prête à confusion, car on a déjà manipulé des fonctions comme `setup()` et `loop()`, mais vous pouvez créer vos propres fonctions qui se comporteront de manière identique.

Isolons donc la vérification du bouton en une fonction appelée `verifBouton()`. Elle aurait pu porter un nom différent, à condition que ce ne soit pas un mot déjà utilisé par ailleurs, pour un tout autre sujet. La fonction `verifBouton()` est décrite à la fin du programme, précédée par le mot-clé `void`, car elle ne retourne aucune valeur au reste du programme.

`void verifBouton()` est l'en-tête de la fonction. À la suite, les instructions sont encadrées par deux accolades. Cette fonction réalise les actions suivantes :

- Attendre 50 ms que le contact ait fini de rebondir.
- Attendre que le bouton soit relâché.
- Attendre à nouveau 50 ms, le temps que le contact qui vient d'être relâché ait fini de rebondir.
- Attendre que le bouton soit de nouveau enfoncé. En d'autres termes, attendre que la période où le bouton est relâché cesse.

- Réinitialiser la variable `ignore`.

Quand le microcontrôleur atteint la fin de la fonction, le contrôle est rendu à la ligne suivant immédiatement celle qui a appelé la fonction ; dans notre cas, c'est celle qui est à la suite du bloc `if`. Pour appeler une fonction, il suffit d'écrire son nom, parenthèses incluses – même si dans le cas présent elles ne contiennent aucun paramètre.

Dans un programme, vous pouvez et vous devez créer autant de fonctions que vous souhaitez, chacune réalisant une tâche distincte. Pour approfondir les fonctions, il vous faudra consulter un ouvrage de référence générale du langage C. La documentation Arduino n'est pas très détaillée à leur sujet ; pourtant, elles sont au cœur du langage C.

Structure des programmes

La ligne qui commence par `if (millis()) > ignore` réalise la même action que l'étape 4 de mon pseudocode, mais en sens inverse. Au lieu de décider si elle doit redonner le contrôle au début du programme, elle détermine si elle doit ou non appeler la fonction `verifBouton()`. Le pseudocode déclarait « si (le bouton n'est pas enfoncé OU la valeur de l'horloge du système est inférieure à la valeur `ignore`), retourne à l'étape 0 ». La version modifiée dit « si la période pendant laquelle l'état du bouton est ignoré est terminée ET si le bouton est enfoncé, appelle la fonction `verifBouton()` ».

Après que le microcontrôleur a fait cela, il retourne au programme appelant, puis atteint la fin de la boucle principale `loop()` qui se répète indéfiniment.

Ce programme ne fait qu'une action. Il choisit des nombres aléatoirement et les affiche sous forme de points, de façon répétitive. Si le bouton est enfoncé, il fait une pause et attend. Si le bouton est à nouveau enfoncé, le programme reprend ce qu'il faisait auparavant. La routine de vérification du bouton n'est qu'une interruption momentanée.

La structure normale de ce programme contient une boucle principale qui ne fait que le choix et l'affichage des nombres. Quand le bouton est actionné, le microcontrôleur fait un détour par la fonction `verifBouton()`, puis revient.

La documentation Arduino ne mentionne pas ce qui est relatif à la structure des programmes, car elle est rédigée afin que vous puissiez obtenir un résultat le plus rapidement possible. Arduino vous oblige uniquement à utiliser la fonction `setup()` suivie de la fonction `loop()`

et c'est tout. Cependant, quand la taille du programme commence à augmenter, il est indispensable de le diviser en fonctions pour éviter qu'il ne devienne trop touffu.

Si vous vous contentez d'utiliser l'Arduino pour exécuter des ordres simples, comme le déclenchement du chauffage quand une pièce est trop froide, vous pouvez écrire toutes les instructions dans la fonction `loop`. Cependant, c'est sous-utiliser le microcontrôleur dont les possibilités sont infiniment plus importantes. La difficulté vient de la multiplication du nombre des instructions, quand vous décidez de faire quelque chose de plus sophistiqué, comme simuler le jet d'un dé. Il est alors nécessaire de les structurer pour que le programme conserve une clarté suffisante.

Il y a un autre avantage à diviser un programme en fonctions. Elles peuvent être stockées séparément et réutilisées par la suite dans d'autres programmes. La fonction `verifBouton()` pourrait être réutilisée dans n'importe quel jeu nécessitant de stopper une action en appuyant sur un bouton et de la redémarrer en appuyant à nouveau sur le bouton.

Vous pouvez également utiliser, dans votre propre programme, des fonctions écrites par d'autres personnes, à condition que les auteurs l'autorisent, en respect de leur copyright. De très nombreuses fonctions en langage C sont disponibles gratuitement en ligne, beaucoup d'entre elles étant spécifiquement écrites pour les cartes Arduino. Il existe, par exemple, des fonctions permettant de piloter pratiquement n'importe quel afficheur alphanumérique. Cela m'amène à formuler une recommandation importante à tous les programmeurs : ne réinventez pas la roue !

Il est inutile que vous perdiez du temps à écrire vos propres fonctions, si quelqu'un d'autre vous autorise à utiliser les siennes.

C'est une autre raison de l'importance du concept des fonctions dans le langage C.

Mais n'est-ce pas trop difficile ?

Plus vous écrivez de programmes, plus cela devient facile. La courbe d'apprentissage est raide au début, mais avec un peu de pratique, vous écrirez des boucles `for` sans même y prêter attention. Tout deviendra évident.

C'est ce que les programmeurs ont l'habitude de dire. Dans la communauté des makers, on croit souvent que n'importe qui peut maîtriser la technique qu'il aborde. J'adhère moi-même à cette croyance, mais la programmation des ordinateurs pousse cette philosophie à ses limites.

J'ai enseigné un cours d'initiation à la programmation et j'ai pu constater des attitudes très différentes parmi les étudiants. Certains considéraient la programmation comme une forme naturelle de la pensée, alors que d'autres trouvaient cela très difficile, sans rapport réel avec l'intelligence.

À une extrémité de l'échelle, à la suite d'une session de 36 heures de classe échelonnées sur 12 semaines, un étudiant a pu écrire le programme d'une simulation de machine à sous, comprenant les graphismes de rotation des tambours et la chute des pièces de monnaie.

À l'autre extrémité, j'avais un étudiant pharmacien loin d'être stupide qui, malgré ses efforts, ne parvenait pas à écrire correctement la syntaxe d'une simple instruction `if`.

À cette occasion, j'ai compris un point fondamental : pour devenir un bon programmeur, vous devez être capable de réfléchir à la manière d'un ordinateur.

Quelle qu'en soit la raison, le pharmacien n'y parvenait pas. Son cerveau ne fonctionnait pas ainsi. Il était à même de me décrire un traitement pharmaceutique en détail, sa structure moléculaire et bien plus encore, mais cela lui était inutile pour l'écriture des programmes.

Quand l'Arduino a été commercialisé, ses promoteurs le décrivaient comme un système destiné aux personnes créatives qui ne se considéraient pas comme des programmeurs. Cela supposait que son usage serait simple et que n'importe qui pourrait s'en servir.

Lorsque le langage HTML est apparu, il était présenté selon les mêmes termes : c'était si simple que quiconque pouvait développer ses pages web personnelles. Certaines personnes y sont effectivement parvenues, mais pas toutes. De nos jours, très peu de gens codent manuellement en HTML.

En regardant un peu plus en arrière, à l'aube de l'apparition des ordinateurs, le langage BASIC avait été créé dans l'idée que « chacun puisse s'en servir ». Dans les années 1980, avec l'arrivée des ordinateurs de bureau, ses défenseurs assuraient que tout le monde écrirait des programmes en BASIC pour tenir ses comptes bancaires ou établir des listes de courses. De nombreuses personnes s'y sont risquées, mais combien le font encore ?

Je tiens à souligner ces faits pour vous rassurer, si vous faites partie des gens qui trouvent cela difficile ; il ne doit pas y avoir de stigmatisation à ce sujet. Je suis certain que vous avez de nombreuses autres compétences à

exploiter. La réalisation de systèmes utilisant des composants individuels en est une, qui nécessite une forme de pensée différente. Personnellement, je trouve qu'écrire un programme est plus simple que de concevoir un circuit, mais pour quelqu'un d'autre, ce sera le contraire.

Extension du programme des dés magiques

Comme pour la version de ce projet qui est présentée dans l'expérience 24, la première amélioration qui vient à l'esprit est de l'étendre à la simulation de deux dés. Avec la carte Arduino Uno, la tâche est facile car elle possède des sorties digitales capables de piloter un jeu de LED supplémentaires. Vous n'aurez qu'à dupliquer la partie du programme qui débute par l'extinction des LED et se termine par `delay(20)` ; en remplaçant les numéros des broches, dans les instructions `digitalWrite()`, par celles utilisées pour les nouvelles LED.

Les autres microcontrôleurs

J'ai déjà mentionné le microcontrôleur PICAXE. Sa documentation est bonne, le support technique excellent et son langage est aussi facile à apprendre que le langage C. C'est surprenant qu'il ne soit pas plus populaire : peut-être à cause de son nom bizarre ? Vous devriez l'examiner de plus près, en commençant par consulter les articles Wikipédia à son sujet, par exemple.

Le système BASIC Stamp a un vocabulaire de commandes plus riche que celui du PICAXE et un plus grand nombre de dispositifs périphériques compatibles (dont des afficheurs avec des possibilités graphiques et un petit clavier spécifiquement conçu pour lui). Vous pouvez vous le procurer sous forme d'une petite carte, équipée des composants montés en surface, qui peut être insérée dans une platine d'essai (figure 5-92). C'est une carte de belle facture.

Concernant les aspects négatifs, on peut citer le prix du matériel : BASIC Stamp est un peu plus cher que le PICAXE, et la procédure de téléchargement n'est pas aussi simple.

L'apparition de nouveaux produits, comme le Raspberry Pi, a étendu les possibilités des microcontrôleurs à celles d'un ordinateur. À l'heure où vous lirez ces lignes, d'autres alternatives auront fait leur apparition dans cet univers changeant. Avant de vous lancer dans l'étude de l'un de ces produits en détail, je pense qu'il serait utile de passer un ou deux jours à consulter la documentation et les forums les concernant.

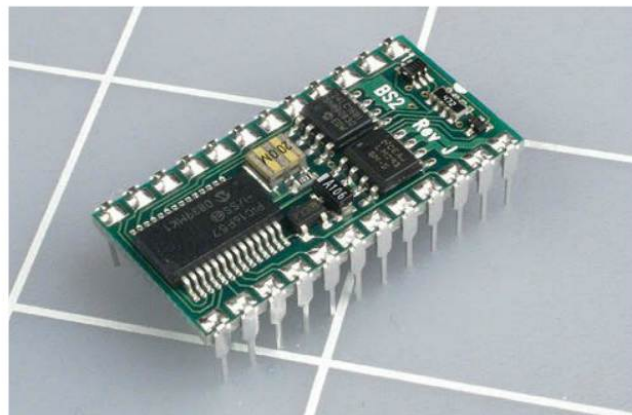


Figure 5-92. Un microcontrôleur BASIC Stamp est réalisé sous forme d'une petite carte de circuit imprimé peuplée de composants montés en surface. Ses broches de liaison, espacées de 2,54 mm, permettent de l'insérer sur une plaque de montage.

Sujets inexplorés

Si vous avez pris le temps de terminer les projets de ce livre, vous avez découvert les principes les plus fondamentaux de l'électronique.

Voici quelques sujets qu'il vous reste à explorer. Il vous faudra faire des recherches en ligne pour les développer.

- L'approche fondamentale de l'apprentissage par la découverte utilisée dans ce livre est assez dépourvue de théorie. J'ai tenu à éviter la plupart des théories mathématiques, que vous devriez apprendre, en suivant une formation rigoureuse. Si vous avez des connaissances mathématiques, utilisez-les pour approfondir votre connaissance du fonctionnement des circuits.
- Nous n'avons pas beaucoup parlé du système binaire. Nous aurions pu réaliser un demi-additionneur, qui est un moyen efficace pour comprendre le fonctionnement des ordinateurs au niveau conceptuel de base. Ce sujet est abordé dans *L'électronique en pratique 2*.
- J'ai évité de détailler les propriétés fascinantes et magiques du courant alternatif. Là encore, une approche mathématique est nécessaire et le simple comportement du courant alternatif aux hautes fréquences est un sujet en lui-même.

- Pour des raisons déjà évoquées, j'ai évité de parler des composants montés en surface, mais vous pourrez découvrir assez facilement ce domaine par vous-même, si vous êtes attirés par la miniaturisation des circuits.
- Je n'ai pas parlé des tubes à vide car, de nos jours, ils présentent un intérêt essentiellement historique. Ils ont cependant un attrait, pour des raisons esthétiques, notamment si vous les utilisez dans un appareil au design soigné. Entre les mains de créateurs, les amplificateurs et les récepteurs radio à tubes sont devenus des objets d'art.
- Je ne vous ai pas montré non plus comment graver vos propres circuits imprimés. C'est une activité qui n'attire que quelques rares passionnés, car elle nécessite de tracer des plans ou d'utiliser un logiciel spécifique. Si vous avez ces possibilités, vous pourrez graver vos propres circuits. Ce pourrait être une première étape vers la production en masse de vos réalisations.
- Je n'ai pas du tout abordé l'électricité statique. Les éclateurs à haute tension n'ont guère d'application pratique et ils présentent certains dangers, mais ils sont étonnamment impressionnants et les informations pour les réaliser se trouvent facilement. Peut-être pourriez-vous essayer ?
- Les amplificateurs opérationnels et la logique numérique complexe sont d'autres sujets que je n'ai pas traités ici. Vous pourrez les trouver dans *L'électronique en pratique 2*.

Conclusion

L'objectif d'un livre d'introduction est de vous donner un large aperçu de possibilités, vous laissant la liberté de vos choix futurs. L'électronique est un sujet idéal pour ceux qui aiment réaliser par eux-mêmes, car presque toutes les applications – de la robotique à la radiocommande de drones et des télécommunications aux circuits des ordinateurs – peuvent être abordées par une personne seule, travaillant chez elle, avec des moyens réduits.

Lorsque vous serez immergé dans l'électronique qui vous intéresse, je suis certain que vous en retirerez beaucoup de satisfaction. Et que vous vous amuserez !

Outils, composants et fournitures



Ce chapitre est divisé en quatre parties.

Rechercher et acheter en ligne. J'ai réuni quelques conseils afin de vous aider à vous approvisionner.

Listes de composants et fournitures. Vous trouverez dans cette section le détail de tout ce dont vous avez besoin pour les expériences de cet ouvrage.

Achat des outils. J'ai établi une liste de tous les outils décrits au début de chaque chapitre de ce livre, en incluant quelques suggestions d'endroits où vous pourrez vous les procurer.

Fournisseurs. Il s'agit de la liste des sources d'approvisionnement possibles. Les abréviations de cette liste sont reprises dans les guides d'achat.

Rechercher et acheter en ligne

Voici quelques conseils généraux concernant la recherche des composants, car de nombreux lecteurs de la première édition de ce livre semblent avoir eu des difficultés à obtenir les informations attendues. Je commencerai par les considérations les plus élémentaires permettant de progresser. Même les acheteurs les plus chevronnés pourront y trouver des astuces utiles.

Dans la suite de ce chapitre, la plupart des fournisseurs sont cités sous forme abrégée de 3 lettres. Vous trouverez leurs noms développés dans la section « Fournisseurs » page 306.

Les **composants électroniques** se trouvent chez de nombreux vendeurs en ligne, la plupart imposant des quantités minimales.

Les fournisseurs crd, dgk, far, got, lex, rsp et sel, qui expédient de France ou d'Europe, ont des stocks importants. Vous y trouverez vos composants.

Ne négligez pas non plus eBay où les prix sont souvent plus bas, en particulier si vous achetez auprès de vendeurs asiatiques. En revanche, ce site ne propose pas toujours les circuits intégrés les moins courants.

Les sites Aliexpress.com et dx.com proposent les offres de nombreux fournisseurs asiatiques pour les composants électroniques, mais également pour d'autres types de produit. Les prix sont en général intéressants et le choix abondant ; cependant, les délais de réception peuvent atteindre plusieurs semaines. Il vous faudra également considérer les frais de douane éventuels.

Les **outils** se trouvent sur ama, eby et chez de nombreux fournisseurs de composants électroniques. Certains sites, comme McCarter-Carr, proposent de nombreux tutoriels – traitant par exemple des propriétés des différents plastiques, ou une comparaison entre les multiples forets de perçage.

L'art de la recherche

La recherche d'une référence, quand vous la connaissez, est très simple. Il suffit de l'entrer dans le champ de recherche d'un site comme mouser.fr, où l'algorithme de recherche est assez sophistiqué pour accepter une grande flexibilité. Par exemple, si vous recherchez un circuit intégré logique 7402, Mouser va vous indiquer que le circuit SN7402N de Texas Instruments correspond sans doute à votre recherche, sachant que Texas Instruments ajoute SN devant le numéro de référence de base et N à la suite.

Le résultat de la recherche n'englobera pas les références comportant un code additionnel ajouté au milieu, par exemple le SN74HC02N. Pour les inclure, le champ de recherche devra préciser ce code.

Dialoguez avec les conseillers en ligne

Si vous n'avez qu'une information incomplète concernant une référence, ou si vous souhaitez savoir si un composant est obsolète, et dans tous les cas où vous avez besoin d'aide, ne négligez pas la possibilité de joindre le vendeur par téléphone. Les distributeurs ont des vendeurs qui peuvent vous renseigner. Peu importe que vous soyez un particulier achetant des quantités faibles.

Mieux encore, ouvrez une fenêtre de discussion (*chat*). Vous pourrez copier/coller la référence recherchée dans la fenêtre, pour obtenir rapidement une réponse vous informant de la disponibilité du composant, ou vous proposant un composant de substitution.

Google et les composants

Si vous souhaitez obtenir une comparaison entre différents fournisseurs, il vous faut utiliser un site de recherche générique. Google est très bien adapté à nos recherches.

Si la référence est longue et complexe, vous aurez davantage de chance de trouver ce que vous recherchez, en éliminant les offres de produits non désirés. Si vous lancez une recherche avec seulement 7402, Google vous proposera des résultats comprenant des produits n'ayant rien à voir avec le circuit intégré recherché. En revanche, une recherche lancée avec 74HC02 réduira la quantité des réponses et celles-ci seront limitées aux circuits intégrés logiques correspondants.

Malheureusement, vous obtiendrez également une liste de revendeurs de fiches techniques (*datasheet*). Ces sociétés ont une multitude de fiches techniques provenant des divers fabricants de composants, qu'ils regroupent afin de vous faire payer leur « service ». Cela n'est pas très gênant, mais bien souvent, la fiche technique est présentée page par page, car elle contient des messages publicitaires. L'attente entre chaque page est une perte de temps importante. Utilisez le signe moins pour ne pas obtenir les résultats comprenant le mot *datasheet*, de la façon suivante : 74HC02 - *datasheet*.

N'utilisez pas le terme fiche technique, qui est rarement utilisé, mais le mot datasheet, beaucoup plus populaire.

Lorsque vous entrez une référence, le moteur de recherche ne sera pas à même de compenser correctement de légères erreurs de frappe. Google comprendra

compteur, si vous entrez par erreur conpteur, mais en lui indiquant 84HC02, il ne sera pas à même de rectifier et de vous proposer les résultats correspondant à 74HC02.

Fiches techniques

Comment obtenir une fiche technique afin de vérifier les caractéristiques d'un composant avant de l'acheter ?

Rendez-vous sur le site d'un revendeur, pour rechercher la référence souhaitée. Vous trouverez souvent une icône donnant accès à la fiche, en général un fichier au format PDF, proposée par le fabricant du composant. C'est plus rapide que de passer par le site d'un revendeur de fiches techniques.

Méthodes de recherche

Si vous recherchez un type de composant, un argument de recherche court et vague est souvent inefficace. Si vous lancez une recherche avec interrupteur, les premiers résultats affichés correspondent à de multiples offres d'interrupteurs muraux pour l'éclairage des habitations et à la définition Wikipédia d'un interrupteur.

Comment éviter ces résultats non désirés ?

En premier lieu, il faut ajouter un ou plusieurs mots définissant votre centre d'intérêt, par exemple interrupteur électronique. Mieux encore, si vous recherchez un interrupteur DPDT supportant 1 A, exprimez-le ainsi : interrupteur DPDT 1A ou «interrupteur bipolaire à levier» 1A. Remarquez la présence des guillemets qui permettent de verrouiller une expression précise, évitant que Google ne vous fournisse des résultats comprenant les mots écrits dans un ordre différent.

Vous pouvez également restreindre votre recherche en précisant une source d'approvisionnement, par exemple «interrupteur DPDT» 1A amazon.

J'ai mentionné Amazon à titre d'exemple parce que, souvent, le moteur de recherche d'un revendeur est moins puissant que celui de Google. Le site d'Amazon, par exemple, ne semble pas reconnaître les guillemets, mais accepte que Google parcoure ses pages et les indexe, pour vous mener directement à la liste correspondant au produit recherché dans le site Amazon.

En vous rendant directement sur le site d'un revendeur, votre recherche pourrait être moins efficace.

Exclusions

Utilisez le signe moins pour exclure les résultats que vous ne souhaitez pas obtenir. Si, par exemple, vous n'êtes intéressé que par les interrupteurs de grande taille, recherchez «inverseur bipolaire à levier» 1A - miniature.

Notez que le moteur de recherche d'Amazon ne reconnaît pas non plus le signe moins.

Alternatives

N'oubliez pas d'utiliser les opérateurs logiques AND et OR. Si un interrupteur unipolaire vous convient tout autant qu'un interrupteur bipolaire, vous pourriez rechercher de la façon suivante : «interrupteur à levier» DPDT OR SPDT 1A - miniature.

Cela peut toutefois vous mener à des résultats incomplets, car les dénominations des composants électroniques ne sont pas toujours cohérentes. Certains fournisseurs utilisent l'abréviation DPDT, d'autres 2P2T pour un double inverseur, ou 1PDT au lieu de SPDT pour un simple inverseur. Vous devrez alors utiliser de nombreux opérateurs OR pour faire vos recherches.

Trop de frappe au clavier ?

Un argument de recherche correctement construit permet de gagner du temps, en évitant trop de recherches consécutives. Cependant, si vous ne souhaitez pas élaborer et entrer un argument de recherche conséquent, vous avez d'autres possibilités. Vous pouvez utiliser l'option Images que Google vous proposera immédiatement avant chaque ensemble de résultats. Cette option est située en haut et à gauche de la page, juste après le mot Tous. Google images vous présentera rapidement des illustrations de toutes les sortes de composants correspondant à votre recherche. Le cerveau humain étant conçu pour interpréter les images plus rapidement, c'est un moyen de recherche plus efficace qu'en parcourant une succession des textes.

Vous pouvez également utiliser l'option Shopping de la page de résultats Google. Elle liste les résultats selon un tri qui peut être défini, par exemple, par ordre de prix croissant, chez de multiples revendeurs, à l'exclusion de certaines boutiques.

Catégories de produits

Une autre possibilité consiste à utiliser le classement des produits par catégorie du site d'un revendeur.

Chez mouser.fr, digikey.fr ou selectronic.fr, une recherche pour interrupteur vous retournera la liste des différents types d'interrupteurs. En cliquant sur un des types présentés, vous accéderez à des options supplémentaires permettant de restreindre la recherche.

Parfois, une fenêtre présentant l'ensemble ses attributs de recherche, tels que tension, intensité et autres valeurs, vous aide à affiner votre recherche. C'est cependant parfois frustrant car les paramètres ne sont pas toujours présentés de façon rationnelle. Ainsi, des interrupteurs sont parfois regroupés par l'argument 0,5 A, d'autres avec 500 mA. Ces paramètres sont identiques, mais les personnes qui créent les listes recopient les spécifications des fiches techniques, certaines utilisant des milliam-pères, d'autres les ampères.

En maintenant la touche Ctrl enfoncée (Commande pour Mac), vous pouvez cliquer avec la souris pour sélectionner plusieurs critères simultanément, par exemple 0,5 A et 500 mA, ainsi que d'autres paramètres pouvant correspondre à votre recherche, incluant 1 A pour trouver des interrupteurs de calibre plus élevé.

Que choisir en premier ?

En utilisant les catégories de produits du site d'un vendeur, il est recommandé de commencer par choisir les critères les plus importants. Si vous recherchez des circuits intégrés logiques, commencez par sélectionner la catégorie des traversants, puisque vous ne voulez pas de Composants Montés en Surface (CMS). Cependant, il faut savoir que DIP (Dual-Inline-Package) est presque identique à PDIP (Plastic DIP), l'un ou l'autre étant identique à traversant (Through Hole). Par ailleurs, il faut se rappeler que le format d'un circuit intégré identifié par la lettre S précédant sa référence est presque toujours un composant CMS dont vous n'avez pas l'utilité. SMT, en particulier, signifie « Monté en Surface » (Surface Mount).

Exemple d'une recherche

Voici l'exemple d'une recherche réelle que j'ai effectuée, concernant un composant qui est utilisé dans ce livre. Je savais ce que je voulais que ce composant fasse, mais je n'en connaissais pas la référence.

Je recherchais un compteur ayant une sortie sur 3 bits pour l'utiliser dans les dés magiques de l'expérience 24. Je suis allé sur le site mouser.fr et ai commencé ma recherche par compteur.

Alors que j'entrais ce mot au clavier, Mouser me proposait de le compléter automatiquement ; CI de compteur m'était suggéré (entre autres). CI est l'abréviation de circuit intégré. J'ai donc cliqué sur cette proposition, ce qui m'a conduit sur une page me proposant 802 correspondances. En haut de page, une fenêtre me permettait d'affiner ma recherche par fabricant, type de compteur, famille logique et bien plus. Comment m'y prendre ?

J'ai d'abord parcouru horizontalement cette fenêtre afin de choisir le type de montage du composant recherché. Seules deux options m'étaient proposées : SMD/SMT et Through Hole (c'est-à-dire les composants traversants qui peuvent être insérés dans une plaque de montage, sans avoir besoin d'une loupe puissante). J'ai donc cliqué sur l'option Through Hole, puis sur le bouton Appliquer des filtres, ce qui a réduit la liste des composants suggérés à 157 correspondances.

Tous les circuits intégrés logiques utilisés dans ce livre appartenant à la famille 74HC, J'ai cliqué sur ce critère dans la fenêtre correspondant à la famille logique. Néanmoins, me souvenant que Mouser indique souvent la même chose sous différents noms, j'ai parcouru les critères de la fenêtre et ai trouvé le mot HC sur lequel j'ai également cliqué, tout en maintenant la touche Ctrl enfoncée.

Il me restait alors 43 choix. J'ai ensuite cliqué sur l'option Binary, car je recherchais un compteur binaire de 3 bits.

La liste s'est alors réduite à 32 choix possibles. Comme aucune option 3 bits n'était proposée, j'ai sélectionné 4 bits, car je pouvais utiliser un tel compteur en ignorant le quatrième bit. Il y avait deux choix possibles dans la fenêtre Nombre de bits : 4 et 4 bits. J'ai donc sélectionné les deux, à l'aide de la touche Ctrl associée au bouton gauche de la souris.

18 composants étaient encore proposés. En choisissant l'option Up dans la séquence de comptage, il ne me restait plus que 8 choix, parmi lesquelles se trouvait le composant recherché. Je souhaitais utiliser le plus largement disponible, ce que j'ai déterminé en regardant la quantité en stock. Comme il restait plus de 2 600 circuits intégrés SN74593N de Texas Instruments en stock, c'est celui que j'ai retenu.

J'ai ensuite cliqué sur SN74HC393N fiche technique, afin de vérifier que ce circuit intégré correspondait à ce que je souhaitais. C'est un circuit à 14 broches, délivrant une intensité de 25 mA de façon permanente, alimenté sous une tension nominale de 5 V CC. C'était donc bien un circuit intégré standard de la famille 74HCxx. Il contient deux compteurs binaires à 4 bits, mais je n'en utiliserais que deux ; ce point ne me préoccupait pas. En fait, je me suis dit que je pourrais utiliser le deuxième compteur lors d'une extension de mon projet.

Le 74HC393 ne me coûtait qu'environ 0,50 € à l'unité ; soit un coût total de 3 € pour 6 compteurs. Afin de partager les frais d'envoi, sans surcoût, je réfléchissais à d'autres articles légers à ajouter à mon panier. Toutefois, j'ai d'abord imprimé la fiche technique du 74HC393 et je l'ai placée dans mon classeur de documents papier.

Vous avez sans doute remarqué que cette procédure demandait de cliquer de nombreuses fois, mais je n'ai passé que dix minutes à trouver exactement ce que je cherchais.

J'aurais pu procéder différemment, car je savais que je voulais un circuit intégré de la famille 74HCxx, en me rendant sur la page Wikipédia qui recense tous les circuits intégrés de la série 74xx.

Si vous vous rendez sur cette page, vous pouvez utiliser la recherche du navigateur (touches Ctrl + F), en précisant : compteur binaire de 4 bits pour trouver tous les compteurs correspondants.

La phrase recherchée doit correspondre exactement au contenu de la page ; ainsi, il faut entrer de 4 bits et non pas à 4-bits. Vous pouvez ainsi balayer toutes les occurrences et comparer les caractéristiques détaillées des circuits intégrés correspondants. Après avoir choisi celui qui vous convient, il vous suffit de copier sa référence dans le presse-papier Windows, pour le rechercher dans le site de votre fournisseur.

Le seul problème avec Wikipédia est qu'il est impossible de déterminer si les circuits intégrés proposés sont toujours en production et disponibles. Il est préférable de choisir des composants très répandus, car si vous réalisez un projet utilisant des circuits intégrés anciens, vous serez limités aux technologies du passé.

J'aurais pu utiliser une autre approche, en lançant une recherche Google pour accéder aux forums de discussion dans lesquels des passionnés échangent des avis au sujet des compteurs binaires de 4 bits. Cela donne une idée générale, mais ne fournit pas la référence de choix idéale.

L'option eBay

Je me procure de nombreux composants par eBay, car j'y trouve des promotions et les sociétés qui vendent par ce biais sont en général rapides et fiables. Afin de minimiser le temps de recherche et d'éviter les erreurs, il est bon de connaître quelques astuces de recherche propres à ce site.

D'abord, n'hésitez pas à utiliser la recherche approfondie (en haut et à droite du bouton de recherche d'eBay, sur la page d'accueil du site). Cette option vous permettra de spécifier des critères tels que le pays d'origine (si vous voulez éviter les vendeurs étrangers) et de limiter la recherche aux articles en vente immédiate. Vous pourrez également spécifier un prix minimal, qui vous permettra d'éliminer les objets trop peu coûteux pour être de qualité. Avant de commencer ma recherche, je spécifie de trier les résultats par ordre de prix+livraison les moins chers.

Quand vous aurez trouvé ce que vous cherchez, vérifiez les évaluations du vendeur. Je n'ai jamais eu de problème avec des vendeurs occidentaux dont les évaluations positives atteignent 99,8 %, mais j'ai déjà rencontré des difficultés avec des vendeurs ayant pourtant 99,7 % d'évaluations positives. Si un vendeur est localisé en Asie, en Chine, à Hong-Kong, en Thaïlande ou ailleurs, ne soyez pas trop exigeant en ce qui concerne le taux d'évaluations positives car, en raison des délais de livraison importants, de nombreux acheteurs décernent des notes négatives. Un vendeur asiatique indique toujours qu'un petit objet mettra au minimum 10 à 14 jours avant d'être reçu, mais les acheteurs se plaignent tout de même. Dans les faits, tous les objets que j'ai commandés à des vendeurs étrangers étaient conformes et me sont toujours parvenus. Il suffit d'être patient.

Après avoir trouvé ce que vous cherchez sur eBay, vous pouvez l'ajouter dans votre panier plutôt que de procéder à un achat immédiat, car vous avez sans doute besoin d'autres objets et vous gagnerez du temps en les regroupant en un seul envoi. Cela réduira également les frais d'envoi.

Cliquez sur l'option [Visiter la boutique](#) dans l'espace indiquant les informations relatives au vendeur ou, dans le cas où le vendeur n'a pas de boutique eBay, sur l'option [Afficher les autres objets](#). Après avoir ajouté à votre panier tous les objets désirés, vous pourrez terminer vos achats.

Vous pouvez prendre contact directement avec les vendeurs étrangers, sans passer par eBay. Par exemple, Tayda Electronics, situé en Thaïlande, est un revendeur très réputé expédiant dans tous les pays (abrégié *tay* dans la liste de la section « Fournisseurs » page 306).

Amazon

Je ne pense pas qu'Amazon.fr soit très utile lors de la recherche de composants, mais c'est une source intéressante en ce qui concerne les outils et les fournitures telles que les fils ou la soudure. Amazon n'aime pas afficher les objets en commençant par les moins chers ; c'est une option à cocher pour chaque recherche, et le tri est impossible si les objets sont situés dans plusieurs catégories. Amazon, contrairement à eBay, ne tient pas compte du coût d'envoi. Une pince plate ne coûtant que 4 € mais dont les frais d'envoi sont de 6 € sera affichée avant une autre pince coûtant 5,50 € mais avec des frais d'expédition limités à 3 €. En revanche, Amazon envoie rapidement les colis et, si vous achetez plusieurs objets livrés par le site, vous pouvez obtenir la gratuité des frais d'envoi.

Désactiver l'option Compléter automatiquement

Citons un dernier point concernant Google. Son mode par défaut vous propose une liste de termes similaires pendant que vous entrez votre phrase de recherche. Si vous êtes gêné par cette option, désactivez-la. Dans la barre d'adresse de votre navigateur, lancez Google en tapant <http://www.google.fr/webhp?complete=0> Sauvegardez cette adresse dans vos favoris ; quand vous la rappellerez, Google ne vous proposera plus de termes approchants.

Cette adresse peut également être utilisée comme page d'accueil de votre navigateur.

Et si la recherche vous fatigue ?

Si vous ne souhaitez pas recourir à toutes ces techniques de recherche, vous pouvez acheter vos composants dans les magasins spécialisés, à partir des listes figurant dans ce livre.

Toutefois, si vous souhaitez réaliser de nombreux projets, en dehors de ce livre (circuit vu sur Internet, conception *ex nihilo*), vous devrez acheter vos composants et, même si vous les achetez chez un seul revendeur, les techniques de recherche vous seront utiles.

Listes des fournitures et composants

Des photos et des informations générales figurent au début de chaque chapitre de ce livre. Vous trouverez ci-après les listes de tous les composants et fournitures, mais je dois d'abord clarifier ce qui distingue ces deux termes.

Les **fournitures** sont les éléments tels que la soudure ou les fils que je vous suggère d'acheter une fois pour toutes, en quantité suffisante pour toutes les expériences. Il est en effet difficile de préciser la longueur exacte de fil utilisée dans chaque projet.

Les **composants** font partie intégrante d'un projet. Vous pourrez les réutiliser, mais uniquement en les retirant d'un projet précédent, par exemple d'une plaque de montage équipée de composants.

Fournitures

Les fournitures suivantes seront suffisantes pour tous les projets. Dans la section « Fournisseurs », à la fin de ce chapitre, vous pourrez consulter la liste des revendeurs chez qui vous pourrez vous procurer ces fournitures, ainsi que les abréviations que j'utilise pour m'y référer.

Fil de câblage

Vous devez vous procurer du fil de câblage monobrin (ou unifilaire) de diamètre 0,6 mm (ou jauge AWG 22) en deux couleurs (rouge et bleu) minimum, l'achat de quatre couleurs étant préférable. Du fil pour automobiles pourra convenir s'il est unifilaire. Vous pouvez rechercher dans Google ou eBay en saisissant la phrase suivante :

fil de câblage unifilaire awg 22

Vous pouvez également acheter du fil de câblage chez les revendeurs spécialisés.

Si vous voulez réaliser les expériences 26, 28, 29, 30 et 31, qui concernent l'utilisation des inductances, vous aurez besoin de d'environ 60 m de fil. Vous pouvez,

temporairement, relier entre eux des fils de couleurs différentes pour bobiner vos inductances. Ces dernières pourront ensuite être débobinées et le fil récupéré pour d'autres usages.

Si vous ne souhaitez pas faire les expériences sur les inductances, je vous suggère d'acheter au minimum trois bobines de 8 m. Vous pourrez trouver des longueurs inférieures, mais le prix par mètre augmente rapidement.

Fils de pontage

Personnellement, je n'aime pas utiliser les fils prédécoupés, mais si vous préférez, vous pouvez acheter un assortiment ; une boîte vous suffira. Vous devrez, en plus, disposer d'environ 8 m de fil rigide pour faire les liaisons de longueur plus importantes que celles des fils de pontage de votre assortiment. Pour trouver des fils prédécoupés, saisissez l'expression : coffret de pontage. Le terme « coffret » permet de trouver un assortiment, évitant les fils souples munis de petits connecteurs à chacune de leurs extrémités, qui sont généralement vendus en quantités variables, mais jamais en coffret.

Fils souples

Ce type de fil est nécessaire quand une certaine flexibilité des connexions est requise. Une bobine d'environ 8 m vous suffira.

Soudure

Le fil de soudure est en général vendu au poids. Dans tous les cas, assurez-vous de bien acheter de la *soudure pour l'électronique* possédant une *âme de résine décapante*. Son diamètre peut être compris entre 0,5 et 1Mm. Pour réaliser un ou deux projets, 1M sera suffisant. Certains vendeurs sur eBay proposent le fil de soudure en petite quantité. Sinon, essayez les fournisseurs amz, crd, cyc, far, lex, got ou sel.

Gaine thermorétractable

C'est une fourniture en option, mais très utile. Un assortiment de 3 ou 4 diamètres différents sera suffisant. Étant donné ses nombreux domaines d'utilisation, vous pourrez la trouver dans les magasins de bricolage ou de fournitures automobiles, comme bri, cas et nor, ou chez les revendeurs spécialisés en maquettes et modèles réduits.

Plaque perforée non cuivrée

Seule l'expérience 14 nécessite une telle plaque. Vous pouvez cependant l'utiliser pour réaliser des versions permanentes de n'importe quel projet de ce livre, en réalisant des soudures point à point. Une plaque d'environ 10 × 20 cm suffira à la réalisation de trois projets.

Il vous sera peut-être difficile d'en trouver. En effet, les plaques sont le plus souvent munies de pastilles ou de pistes de cuivre. Or, les plaques de ce type ne sont pas recommandées pour réaliser des circuits avec des liaisons soudées point par point, car elles augmentent le risque de courts-circuits accidentels.

Recherchez plaque perforée bakelite. Essayez également avec plaque de prototypage ou carte de prototypage ou plaque époxy sans cuivre. La société Keystone Electronics produit des petites plaques perforées sans cuivre que vous pouvez trouver chez mou et dgk. Des plaques sans cuivre sont également proposées par crd, far ou sel.

Plaque perforée cuivrée

Ce type de plaque est utilisé pour la version définitive de l'expérience 18, mais vous pouvez également l'utiliser dans tout autre projet que vous souhaitez réaliser de façon définitive. Pour un usage plus aisé, choisissez des plaques ayant une configuration de pistes de cuivre identique à celle des conducteurs internes d'une plaque de montage. Il vous sera peut-être difficile d'en trouver.

La plaque BusBoard SB830, qui est une carte de prototypage soudable est disponible chez mou. Une carte similaire de la série Perma Proto est disponible chez ada.

L'ensemble plaque de montage et plaque perforée cuivrée Schmartboard 201-0016-31 est également disponible chez mou. Le fabricant conseille de placer la plaque perforée sur la plaque de montage et d'insérer les composants et les fils de liaisons pour réaliser un prototype, puis les tests fonctionnels. Il ne reste plus qu'à soulever la plaque perforée munie des composants et de les souder. Malheureusement, cette solution n'est pas adaptée pour les composants munis de fils très courts.

Visserie

Les vis, boulons et écrous auto-freinés sont disponibles dans les grandes surfaces de bricolage, mais pas nécessairement dans les dimensions requises pour fixer une plaque perforée dans un coffret. Je vous suggère d'acheter des boulons avec vis à tête plate de 3 mm de

diamètre, de longueur 10 mm et 16 mm. Vous les trouverez chez sel et chez de nombreux autres distributeurs de composants électroniques.

Boîtiers et coffrets

Leurs prix sont très variables. Les boîtes en ABS sont en général assez peu coûteuses. Vous les trouverez chez les revendeurs de composants comme ada, crd, cyc, far, lex, mou, rsp, sel ou spk.

Composants

Vous trouverez ci-après les listes des valeurs et quantités requises en ce qui concerne les résistances, les condensateurs et autres composants. Reportez-vous en fin de chapitre à la section « Fournisseurs » pour consulter la liste des revendeurs et les abréviations que j'ai utilisées pour les identifier. Les plus importants sont dgk, eby, far, mou, rsp, sel et con. Les prix varient, mais il est préférable d'acheter vos composants chez le même fournisseur, afin de minimiser les frais d'expédition.

Résistances

Le fabricant importe peu. En général, la longueur des fils est également sans importance. Tous les projets de ce livre peuvent être réalisés avec des résistances de ¼ W (les plus communément disponibles). Une tolérance de 10 % est tout à fait adaptée ; de plus, les anneaux colorés d'une résistance de tolérance 10 % sont plus faciles à interpréter que le marquage des résistances de 5 % ou 1 %.

Le nombre total de résistances utilisées dans chaque partie du livre est indiqué sur la figure 6-1, mais les résistances et les condensateurs étant disponibles par lots, il est inutile d'acheter le nombre exact de composants correspondant à chaque projet. Vous économiserez du temps et de l'argent en achetant des sachets pré-assortis.

Pour satisfaire aux besoins de tous les projets de ce livre, tout en disposant de pièces de rechange, achetez au minimum 10 résistances de chacune des valeurs suivantes : 47 Ω, 220 Ω, 330 Ω, 1K, 2,2K, 4,7K, 6,8K, 10K, 47K, 100K, 220K, 330K, 470K et 1M. Achetez également 20 résistances de 470 Ω. Les quantités que j'ai spécifiées supposent que vous réutiliserez les résistances d'une expérience à l'autre.

Résistances	Chapitres du livre					Total
	1	2	3	4	5	
47 ohms				2	1	3
100 ohms				6		6
150 ohms				6		6
220 ohms				8		8
330 ohms				3	8	11
470 ohms	2	6	4	12		24
680 ohms				10		10
1K	2	2	1	4		9
2,2K	1			5		6
4,7K		4	2			6
6,8K					1	1
10K		1	1	41	4	47
47K				1		1
100K		2	1	4		7
220K		2				2
330K				1		1
470K		4	2			6
1M		1		4		5

Figure 6-1. Liste des résistances utilisées dans les expériences des différents chapitres de ce livre.

Condensateurs

Vous les trouverez chez les mêmes fournisseurs que ceux des résistances. Le fabricant est sans importance. Les condensateurs à fils radiaux (situés sur une même face du composant) sont à préférer aux types axiaux (un fil à chaque extrémité). Une tension nominale de fonctionnement de 16 V minimum est recommandée dans le cas de l'utilisation d'une source d'alimentation de 12 V. Vous pouvez choisir des condensateurs de tension de fonctionnement supérieure, mais ils seront plus gros. Les autres caractéristiques, comme la température de fonctionnement et l'impédance interne équivalente (ESR) ne sont pas importantes pour nos projets.

Les condensateurs en céramique dureront plusieurs décennies, alors que les condensateurs électrolytiques ont une durée de vie moindre. Pour les valeurs les plus importantes, vous devrez cependant choisir des condensateurs électrolytiques, car le prix des condensateurs en céramique devient prohibitif. Personnellement, j'utilise des condensateurs en céramique pour les valeurs

inférieures à 10 µF et des électrolytiques au-delà. Vous ferez des économies en utilisant des électrolytiques à partir de 1 µF.

Consultez la figure 6-2, pour connaître le nombre précis de condensateurs requis dans chaque chapitre de ce livre.

Pour satisfaire aux besoins de tous les projets de ce livre, tout en disposant de pièces de rechange, achetez au minimum 5 condensateurs de chacune des valeurs suivantes : 0,022 µF, 0,047 µF, 0,33 µF, 1 µF, 2,2 µF, 3,3 µF, 100 µF, 220 µF. Vous avez aussi besoin d'un condensateur de 33 µF. Procurez-vous également 10 condensateurs de 0,01 µF, 0,1 µF et 10 µF, et uniquement 2 condensateurs de 15 µF, 22 µF, 68 µF et 1 000 µF.

Condensateurs	Chapitres du livre					Total
	1	2	3	4	5	
0,01 µF		2		18	3	23
0,022 µF				1		1
0,047 µF				1		1
0,1 µF		3		9		12
0,33 µF		2		5		7
1 µF		2		4	2	8
2,2 µF					1	1
3,3 µF		2	2	3		7
10 µF		1		8	1	10
15 µF				1		1
22 µF				2		2
33 µF		1				1
68 µF				2		2
100 µF		2		5	1	8
220 µF		1	1		3	5
1,000 µF		2			2	4

Figure 6-2. Liste des condensateurs utilisés dans les expériences des différents chapitres de ce livre.

Autres composants

La figure 6-3 résume les quantités minimales nécessaires pour réaliser tous les projets des chapitres 1, 2 et 3. Ces quantités sont établies en considérant que vous réutiliserez tous les composants dans les expériences suivantes. Les composants additionnels nécessaires pour le chapitre 4 viennent en complément de ceux prévus pour

les chapitres précédents. Les composants du chapitre 5 ne sont pas listés, en raison de la grande diversité des expériences. Consultez le début de chaque expérience pour connaître les composants nécessaires.

Si vous craignez d'endommager les circuits intégrés ou les transistors, qui sont des composants fragiles, ajoutez 1 ou 2 composant(s) à chaque quantité de la figure 6-3.

Si vous décidez de conserver de façon permanente certains circuits, au lieu de réutiliser leurs composants dans les expériences suivantes, consultez la liste des expériences concernées et ajoutez la quantité indiquée pour chaque composant.

Consultez la section « Fournisseurs » à la fin de ce chapitre pour connaître la liste des revendeurs et l'abréviation que j'utilise pour identifier chacun d'eux. Pour la plupart des composants électroniques, vous pouvez vous adresser à eby, crd, cyc, dgk, far, got, lex, mou, rsp ou sel.

Composants autres que résistances et condensateurs	Chapitres du livre 1, 2 et 3	Compléments pour le chapitre 4
LED générique	4	2
LED à basse consommation	1	15
Pile de 9 V	1	
Connecteur de pile 9 V	1	
Pile de 1,5 V	2	
Support de pile 1,5 V	1	
Plaque de montage	1	
Potentiomètre ajustable 500K	1	
Potentiomètre ajustable 100K		1
Potentiomètre ajustable 20K ou 25K		1
Transistor 2N2222	6	
Petit haut-parleur	1	
Interrupteur à levier	2	
Tactile switch	2	6
Interrupteur tactile		2
Interrupteur à glissière SPDT	2	
Adaptateur secteur	1	
Diode 1N4001	1	
Plaque perforée 8 x 15 cm environ	1	
Fusible 3 A	2	
Potentiomètre 1K	2	
Citrons (ou jus de citron)	2	
Colliers galvanisés	4	
Diode 1N4148		3
Temporisateur 555 série TTL		4
Afficheur LED 7 segments		3
Compteur 4026B		3
74HC00 NON-ET à 2 entrées		1
74HC08 ET à 2 entrées		1
Régulateur LM7805		1
74HC08 OU à 2 entrées		1
74HC02 NON-OU à 2 entrées		1
74HC27 NON-OU à 3 entrées		1
74HC393 compteur		1

Figure 6-3. Nombre minimal de composants, en considérant que vous les réutilisez dans les expériences successives. Les composants prévus pour le chapitre 4 viennent en complément de ceux des trois premiers chapitres.

Composants du chapitre 1

Hormis les résistances et les condensateurs, les composants nécessaires pour le chapitre 1 sont listés sur la figure 6-4.

Composants pour le premier chapitre	Expériences					Total
	1	2	3	4	5	
LED générique			1	2		3
LED à basse consommation					1	1
Pile de 9 V	1		1	1		3
Pile de 1,5 V		2				2
Support de pile 1,5 V		1				1
Fusible 3 A		2				2
Citrons (ou jus de citron)					2	2
Colliers galvanisés					4	4
Potentiomètre 1K				2		2
Eau désionisée (1 verre)					1	1

Figure 6-4. Composants, autres que les résistances et les condensateurs, utilisés dans le chapitre 1 de ce livre.

LED génériques

Les LED Lumex SLX-LX5093ID et Lite-On LTL-10223W sont des exemples possibles, mais des LED génériques se trouvent chez tous les revendeurs. Les LED de diamètre 5 mm sont plus aisées à manipuler que celles de 3 mm, mais ces dernières seront plus faciles à installer sur la plaque de montage d'un circuit comportant de nombreux composants.

L'intensité nominale directe doit être d'environ 20 mA et la tension directe d'environ 2 V CC (pour les LED bleues et blanches, cette tension sera plus importante). Les assortiments de LED que vous pouvez trouver sur eBay sont des LED génériques.

LED à basse consommation

Ces diodes doivent être prévues pour une intensité nominale de 3,5 mA ou moins. La LED Kingbright WP710A10LID est un exemple ; cependant, le fabricant, la taille et la couleur importent peu. Vous pourrez utiliser ce type de LED dans toutes les expériences mais, si c'est le cas, pensez à doubler la valeur de toutes les résistances de protection utilisées, car leur intensité maximale ne devrait pas dépasser 6 mA.

Piles

Les piles alcalines de 9 V se trouvent facilement dans les supermarchés ou les magasins de bricolage. Des piles rechargeables de 9 V peuvent être utilisées.

Les piles AA de 1,5 V, nécessaires dans l'expérience 2, doivent être des piles alcalines. N'utilisez pas de pile rechargeable dans cette expérience.

Supports et connecteurs de piles

Un seul support de pile de 1,5 V est nécessaire. Assurez-vous d'acheter un support prévu pour une seule pile de 1,5 V (et non pas 2, 3 ou 4). Le modèle Eagle 12BH311A-GR par exemple convient très bien.

Procurez-vous au moins trois connecteurs de pile de 9 V, car il sera plus pratique de les maintenir reliés aux circuits que vous réalisez. Ces connecteurs sont aussi appelés clips, contacts à pression ou encore coupleurs... de pile 9 V. Le modèle Keystone 235 ou le Jameco BC6-R sont typiques. Prenez le moins cher en vérifiant qu'il comporte bien deux fils de connexion.

Fusibles

Idéalement, le fusible de 3 A de l'expérience 2 devrait être un modèle pour automobile, muni de languettes de connexion facilitant leur liaison à des pinces crocodile. Ces fusibles se trouvent chez tous les revendeurs de pièces détachées automobiles. Leurs dimensions sont sans importance. Vous pouvez également utiliser une cartouche fusible de 2 A disponible chez un vendeur de composants électroniques. Choisissez un modèle à fusion rapide, à l'opposé d'un modèle à fusion retardée. La tension maximale de coupure n'est pas importante. Le fusible Littlefuse 0208003.MXP est l'un de ceux que vous pouvez choisir.

Potentiomètre

Le potentiomètre de taille normale utilisé dans l'expérience 4 devrait avoir un diamètre de 13 mm environ, mais un plus petit conviendra. La puissance et la tension admissibles, la tolérance, le type d'axe, sa longueur et son diamètre sont sans importance. Choisissez un potentiomètre à variation linéaire, d'angle de rotation limité à un tour, prévu pour être monté sur une face d'équipement et muni de cosses à souder. Prévoyez d'en acheter deux, par exemple le modèle Alpha RV24AF-10-15B1K-3 ou le modèle Bourns PDB181-E420K-102B.

Jus de citron et colliers

Pour l'expérience 5, si vous choisissez du jus de citron en bouteille, vérifiez qu'il ne soit ni dilué, ni à sucre ajouté. Du vinaigre peut être une bonne alternative.

Les colliers de largeur approximative 13 mm utilisés dans l'expérience 5 doivent être galvanisés. Les colliers prévus pour la fixation des tuyauteries sont disponibles dans les magasins de bricolage.

Eau déionisée

Également appelée eau déminéralisée ou distillée, on la trouve en supermarché. Vérifiez toutefois qu'il ne s'agit pas d'eau purifiée ou d'eau de source. Elle doit en effet posséder une minéralité nulle.

Composants du chapitre 2

Hormis les résistances et les condensateurs, les composants nécessaires pour le chapitre 2 sont listés sur la figure 6-5.

Composants pour le deuxième chapitre	Expériences						Total
	6	7	8	9	10	11	
LED générique	1		2	1	1	1	6
Pile de 9 V	1	1	1	1	1	1	6
Connecteur de pile 9 V			1	1	1	1	4
Plaque de montage			1	1	1	1	4
Potentiomètre ajustable 500K					1		1
Transistor 2N2222					1	6	7
Petit haut-parleur						1	1
Interrupteur à levier SPDT	2						2
Interrupteur tactile		1	1	2			4
Relais 9 V CC DPDT		2	1				3

Figure 6-5. Composants, autres que les résistances et les condensateurs, utilisés dans le chapitre 2 de ce livre.

Plaques de montage

Une plaque de montage est considérée comme un composant, car elle ne peut pas être dissociée d'un circuit ; bien au contraire, elle en est la base constituante. Vous devrez décider de la quantité de circuits que vous souhaitez conserver sur leur plaque de montage et combien seront démontés, permettant la réutilisation des platines. L'idéal serait que vos plaques de montage

possèdent un bus d'alimentation de chaque côté et 700 points de connexion, comme celle de la figure 2-10. Lancez une recherche dans Google ou eBay pour :

plaque d'essai sans soudure.

Vous pouvez, toutefois, utiliser une plaque comportant deux bus de chaque côté, en ignorant la rangée de trous supplémentaire.

Potentiomètres ajustables

La figure 2-22 vous présente le type qui est recommandé ainsi que quelques commentaires au sujet des autres types. La puissance admissible n'est pas importante. Le type préféré est monotour et ses broches de connexion doivent être espacées d'un multiple de 2,54 mm (1/10 pouce). Le potentiomètre Vishay T73YP504KT20 est un modèle économique.

Transistors

Avant d'acheter un transistor 2N222, consultez les recommandations importantes de la section « Essentiel : transistors » du chapitre 2 page 47.

Interrupteurs à levier

Ils doivent être prévus pour un montage sur la façade d'un équipement et posséder des pattes de connexion munies de vis. Toutefois, un modèle à souder conviendra. Il peut être de type SPDT ou DPDT. La tension et l'intensité de service sont sans importance pour les expériences de ce livre. Le modèle NKKS302T convient parfaitement, mais on trouve aussi des équivalents moins coûteux.

Interrupteurs tactiles

Le type d'interrupteur fortement recommandé, comportant deux broches espacées de 5 mm est représenté sur la figure 2-19. Il s'insérera facilement dans une plaque de montage. Évitez d'acheter des interrupteurs tactiles plus ordinaires avec 4 fils ou broches. Le modèle ALPS SKRGAFD-010 disponible chez moi est à préférer. Tous les interrupteurs tactiles possédant deux broches de connexion espacées de 5 mm conviendront, par exemple un modèle de la série Panasonic EVQ-11.

Relais

Consultez les informations concernant les relais 9 V CC DPDT recommandés à la section « Essentiel : relais » du chapitre 2 page 45. La compatibilité des modèles Omron G5V-2-H1-DC9, Axicom V23105-A5006-A201 et Fujitsu RY-9W-K a été vérifiée.

Composants du chapitre 3

Les composants nécessaires pour le chapitre 3, autres que les résistances et les condensateurs, sont listés sur la figure 6-6.

De nombreux composants nécessaires aux projets du chapitre 3 ont été déjà mentionnés précédemment dans ce chapitre, dans les sections concernant les chapitres 1 et 2.

Composants pour le troisième chapitre	Expériences			Total
	13	14	15	
LED générique	2	1	1	4
Source d'alimentation de 9 V CC	1	1	1	3
Plaque de montage			1	1
Transistor 2N2222		3	1	4
Diode 1N4001			1	1
Relais 9 V CC DPDT			1	1

Figure 6-6. Composants, autres que les résistances et les condensateurs, utilisés dans le chapitre 3 de ce livre.

Alimentation secteur

Elle doit fournir une tension de sortie de 9 V CC. Elle peut également fournir d'autres tensions de sortie. Consultez la section « Essentiel : l'alimentation secteur », du chapitre 3 page 93 pour les options possibles. L'intensité de sortie minimale devra être de 500 mA CC.

Si vous préférez vous procurer un adaptateur à multiples tensions de sortie, sa recherche pourra s'avérer fastidieuse, car si vous cherchez adaptateur secteur, des centaines de modèles vous seront proposés. Essayez de rechercher :

adaptateur AC 6V 9V

sur eBay, afin d'obtenir quelques offres raisonnables de blocs d'alimentation à tensions multiples. Vérifiez qu'un petit commutateur permette la sélection de la tension souhaitée, ainsi que le type de prise murale compatible, tous les pays n'ayant pas les mêmes standards en ce domaine.

Diodes

La diode de commutation 1N4001 est économique et générique. Achetez-en 8 ou 10 ; il en va de même en ce qui concerne la diode pour signaux faibles 1N4148.

Barrettes de connexion

Ces petits connecteurs mâles et femelles sont optionnels. À titre d'exemple, vous pouvez vous procurer les modèles Mill-Max 800-10-10001000 et 801-93-050-10-001000, ou 3M 929974-01-36RK et 929834-01-36-RK.

Composants du chapitre 4

Hormis les résistances et les condensateurs, les composants nécessaires pour le chapitre 4 sont listés sur la figure 6-7.

Composants pour le quatrième chapitre	Expériences									Total
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
LED générique	1	4	3	2		1	2		1	14
LED à basse consommation					2	1	1	3	15	22
Source d'alimentation de 9 V CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Plaque de montage	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Potentiomètre ajustable 20K ou 25K	1			1						2
Potentiomètre ajustable 100K		1								1
Potentiomètre ajustable 500K	1									1
Interrupteur tactile	2	1	1	3	2	8	2		1	20
Interrupteur à glissière SPDT			2		1		2	2	2	9
Diode 1N4001			1			1				2
Diode 1N4148		1				3				4
Temporisateur 555 série TTL	1	4	4	3		1	2		1	16
Petit haut-parleur		1	1							2
Afficheur LED 7 segments				3						3
Compteur 4026B				3						3
74HC00 NON-ET à 2 entrées					1			1		2
74HC08 ET à 2 entrées					1	1			1	3
Régulateur LM7805					1	1	1	1	1	5
Relais 9 V CC, DPDT			1			1				2
Transistor 2N2222			2			1				3
74HC08 OU à 2 entrées							1		1	2
74HC02 NON-OU à 2 entrées								1		1
74HC27 NON-OU à 3 entrées									1	1
74HC393 compteur									1	1

Figure 6-7. Composants, autres que les résistances et les condensateurs, utilisés dans le chapitre 4 de ce livre.

Interrupteurs à glissière

Il est recommandé de vous procurer un modèle SPDT possédant trois broches de connexion espacées de 2,54 mm, tel que celui de la figure 4-5. Je vous suggère le modèle E-switch EG1218. Si vous achetez un modèle similaire, il devra posséder des broches insérables dans une plaque de montage. L'interrupteur NKK CS12NW03 est un autre modèle trouvé dans eBay. Si vous lancez une recherche avec :

interrupteur à glissière 2,54 mm

vous devriez trouver de nombreux modèles économiques. Le type de métal du contact, ainsi que la tension et l'intensité nominales sont sans importance pour les projets de ce livre.

Circuits intégrés

Consultez les recommandations sur le choix des circuits intégrés à la section « Fondamentaux : choisir un circuit intégré » du chapitre 4 page 133.

La liste des circuits intégrés que vous devez acheter est présentée sur la figure 6-7 (à l'exception d'un temporisateur 555 additionnel, nécessaire pour l'expérience 29). Je vous recommande d'acheter un circuit intégré supplémentaire de chaque référence, car ils sont fragiles en cas de tension incorrecte, de polarité inversée, de surcharge de leurs sorties ou d'électricité statique.

N'importe quel fabricant peut être choisi. Le type de boîtier, ou *package*, se réfère à sa taille physique ; il doit être scrupuleusement respecté lors de l'achat. Le boîtier de tous les circuits intégrés logiques doit être du type DIP (signifiant *Dual Inline Package*) et constitué de deux rangées de broches espacées de 2,54 mm. Le boîtier PDIP (*Plastic Dual Inline Package*) peut également être choisi. Ces boîtiers sont également appelés « traversants ». Le nombre de broches peut également être ajouté après le préfixe DIP ou PDIP, par exemple DIP-14 ou PDIP-16. Ce nombre n'est pas important.

Les circuits intégrés à montage en surface ont des identificateurs de boîtier commençant par S, comme SOT ou SSOP. N'achetez pas ces circuits intégrés.

Les circuits intégrés utilisés dans ce livre appartiennent exclusivement à la famille HC (*high speed CMOS* ou CMOS rapide), tels que le 74HC00, le 74HC08, ou autres identificateurs génériques similaires. Ces références possèdent des caractères, ou des chiffres additionnels indiquant le fabricant, par exemple SN74HC00DBR (de Texas

Instruments) ou MC74HC00ADG (de On Semiconductor). Ce sont des composants fonctionnellement identiques. Regardez attentivement, la référence générique 74HC00 est incluse dans l'identification propre au fabricant.

Les anciens circuits intégrés de la technologie TTL, comme la série 74LS00, présentent des problèmes de compatibilité. Ils ne sont pas recommandés pour les projets de ce livre.

Temporisateur 555

À l'inverse des circuits intégrés logiques, vous devez vous procurer la version TTL de ce temporisateur (également connue sous l'appellation bipolaire) et non pas la version CMOS.

La version TTL (que vous devez acheter), souvent appelée « TTL » ou « bipolaire » dans les fiches techniques, est spécifiée pour une tension d'alimentation minimale de 4,5 V ou 5 V, avec une intensité d'au moins 3 mA en inactivité, et peut absorber ou fournir jusqu'à 200 mA. Ses références commencent souvent par LM555, NA555, NE555, SA555 ou SE555. Si vous lancez une recherche par prix, les versions TTL du temporisateur sont les moins chères.

Les fiches techniques des versions CMOS (qu'il ne faut pas vous procurer), précisent toujours « CMOS » sur la première page, autorisent une tension d'alimentation minimale de 2 V CC dans la plupart des cas et indiquent une consommation exprimée en microampères (et non plus en milliampères). Ces versions ne peuvent pas absorber ou fournir une intensité supérieure à 100 mA. Leurs références comprennent TLC555, ICM7555 ou ALD7555. Si vous lancez une recherche par prix, la version CMOS d'un temporisateur 555 est environ le double de celui d'une version TTL.

Afficheur LED à sept segments

L'afficheur utilisé dans l'expérience 19 doit être de type LED, de hauteur 14 mm environ, de faible consommation, de préférence de couleur rouge, fonctionnant sous une tension de 2 V et une intensité de 5 mA. Le modèle Avago HDSP-513A est recommandé, les afficheurs Lite-On LTS-546AWC ou Kingbright SC56-11EWA ou similaires peuvent également convenir.

Composants du chapitre 5

Les composants nécessaires pour le chapitre 5, autres que les résistances et les condensateurs, sont listés sur la figure 6-8.

Composants pour le cinquième chapitre	Expériences										Total
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
LED générique								1	7		8
LED à basse consommation		1		2							3
Source d'alimentation de 9 V CC	1					1					2
Plaque de montage				1		1			1	1	4
Trombone à papier	1										1
Diode 1N4001		1									1
Aimant au néodyme		1									1
Haut-parleur économique			1								1
Interrupteur tactile				1	1						2
Interrupteur à glissière					4						4
Potentiomètre ajustable 10K					1						1
Potentiomètre ajustable 1M					1						1
Temporisateur 555 de technologie TTL					1						1
Boîte en plastique					1						1
Haut-parleur ø 10 cm minimal					1						1
Circuit intégré amplificateur LM386					1						1
Transistor 2N2222						1					1
15 m de fil souple de diamètre 1,3 mm							1				1
3 m de corde polypropylène ou nylon							1				1
Écouteur à haute impédance							1				1
Diode au germanium							1				1
Arduino Uno								1	1	1	3
Câble USB type A vers B								1	1	1	3
Thermistance CTN 10K									1		1

Figure 6-8. Composants, autres que les résistances et les condensateurs, utilisés dans le chapitre 5 de ce livre.

Aimants au néodyme

Le fournisseur K&J Magnetics propose une documentation complète sur les aimants. Bien que situé aux États-Unis, ce distributeur peut expédier en France. Toutefois, Supermagnete (sup) est un fournisseur reconnu dans l'hexagone. Les aimants peuvent également être achetés sur eBay.

Fil d'antenne de diamètre 1,3 mm (jauge AWG 16)

Ce fil est nécessaire uniquement pour l'expérience 31. Si cette dépense est trop importante, utilisez 15 m ou, mieux, 30 m de fil de câblage d'environ 0,8 mm de diamètre (jauge AWG 22). Ce type de fil devrait convenir si vous habitez assez près d'une station d'émission en modulation d'amplitude (AM).

Écouteur à haute impédance

Uniquement nécessaire à l'expérience 31, il peut être acheté chez got.

Vous pourrez en trouver également sur le site Amazon ou sur eBay, en recherchant oreillette haute impédance ou crystal radio earphone, afin d'accéder à une liste d'anciens modèles d'écouteurs.

Diode au germanium

Comme l'écouteur à haute impédance, seuls quelques distributeurs proposent des diodes au germanium. Vous en trouverez chez crd ou sel, mais également sur eBay.

Carte Arduino Uno

Pour revoir les considérations concernant leur approvisionnement, consultez la section « Méfiez-vous des contrefaçons ! » du chapitre 5 page 263.

Thermistance

La thermistance recommandée pour l'expérience 33 est produite par Vishay sous la référence 01-T-1002-FP. Si vous utilisez un autre modèle, assurez-vous que c'est une thermistance de valeur nominale 10K de type CTN (Coefficient de température négatif) et de précision 2 % ou 5 %, munie de fils de connexion.

Achat des outils

Des photos et des informations générales figurent au début de chaque chapitre de ce livre. La disponibilité des produits évoluant sans cesse, je n'ai pas inclus de références ou de noms de fabricants pour les outils. Les spécifications et les illustrations figurant en début de chaque chapitre devaient vous guider suffisamment et si vous restreignez vos recherches aux grands sites de vente, vous devriez trouver rapidement tout ce dont vous avez besoin.

Il est vrai que les outils les plus coûteux sont fabriqués avec plus de précision et ont une durée de vie plus importante, mais les produits les plus économiques conviennent parfaitement aux projets de ce livre.

Les adresses internet des revendeurs sont indiquées dans la section « Fournisseurs », à la fin de ce chapitre.

Outils du chapitre 1

Pour connaître les recommandations générales sur ces outils et découvrir ces derniers en photo, reportez-vous au début du chapitre 1.

Sauf indication contraire, un seul de chacun de ces outils est nécessaire.

Multimètre

Les caractéristiques des multimètres sont exposées au tout début du chapitre 1.

Des instruments de bonne qualité sont disponibles chez amz, crd, eby et sel.

Fils de test

Les fils de test doivent être munis de pinces crocodiles d'environ 3 cm de long à chaque extrémité. Les fils doivent avoir une longueur totale de 30 à 40 cm (pas plus). Vous aurez besoin d'au moins trois fils de couleur rouge et trois de couleur noire. Des fils d'autres couleurs seront toujours utiles.

N'achetez pas des fils munis de petits connecteurs à leurs extrémités. Ils sont communément appelés « fils de pontage » ou « jumpers ».

Recherchez fil pince crocodile et vous devriez trouver ce qui est recommandé. Achetez-en une dizaine. Les revendeurs comme crd, sel ou spk proposent de tels câbles.

Lunettes de sécurité

Vous en trouverez dans les magasins de bricolage et dans de nombreux sites en ligne, possédant la certification CE ou ANSI Z87. Ce terme peut être utilisé dans vos recherches. Évitez toutefois les lunettes teintées.

Outils du chapitre 2

Pour connaître les recommandations générales sur ces outils et découvrir ces derniers en photo, reportez-vous au début du chapitre 2.

Pince plate à becs allongés

Elle doit mesurer environ 13 cm de long et posséder une mâchoire aplatie et non pas arrondie. Vous en trouverez chez amz, eby et sel, et chez de nombreux autres revendeurs.

Pince coupante

Elle doit mesurer environ 13 cm de long. Vous en trouverez chez amz, eby et sel, et chez de nombreux autres revendeurs.

Pince coupante de précision

Elle n'est pas indispensable, mais vous pourrez en trouver chez amz, eby et sel, et chez de nombreux autres revendeurs.

Pince à dénuder

Vous devez vous procurer une pince prévue pour dénuder les fils des diamètres utilisés. Les pinces les plus communes, permettant de dénuder des fils de jauge AWG 10 à AWG 20 (0,82 à 2,6 mm de diamètre) ne conviennent pas.

La pince à dénuder que vous devez choisir doit être adaptée à des fils de jauge AWG 22, soit 0,65 mm de diamètre, afin de ne pas rendre les opérations de dénudage plus difficiles qu'elles ne le sont déjà. Recherchez en ligne :

pince à dénuder 20 30

Vous devriez trouver ce qu'il vous faut. Vous pouvez vous les procurer chez amz, crd, cyc, eby, sel et chez de nombreux autres fournisseurs.

Outils du chapitre 3

Pour connaître les recommandations générales sur ces outils et découvrir ces derniers en photo, reportez-vous au début du chapitre 3.

Fer à souder de faible puissance

Il doit avoir une puissance nominale de 15 W et posséder une panne métallisée, fine et conique. Vous en trouverez chez tous les revendeurs de composants électroniques, en magasin de bricolage et sur eBay.

Dans tous les cas, faites attention à bien choisir un modèle adapté à votre réseau électrique (type de fiche secteur et tension du réseau).

Fer à souder universel

Il doit avoir une puissance nominale de 30 ou 40 W. Vous en trouverez chez tous les revendeurs de composants électroniques, en magasin de bricolage et sur eBay.

Dans tous les cas, faites attention à bien choisir un modèle adapté à votre réseau électrique (type de fiche secteur et tension du réseau).

Troisième main

Vous pourrez vous procurer cet outil chez ada, amz, eby ou spk, tout comme chez crd, sel et chez beaucoup d'autres revendeurs.

Grip-fils miniatures

Le modèle Pomona 6244-48-0 se trouve chez Amazon, Digikey, Farnell, Mouser ou sur eBay qui vous proposeront également des cordons de mesure munis de pinces crocodiles.

Pistolet à air chaud

Des modèles ordinaires dénommés « décapeurs thermiques » sont en vente dans tous les magasins de bricolage, mais vous pourrez également trouver des modèles plus petits et plus précis, notamment prévus pour la soudure des matières plastiques. Essayez une recherche avec pistolet à air chaud.

Matériel de dessoudage

L'ensemble du matériel de dessoudage est disponible chez amz, crd, cyc, sel et sur le site eBay.

Support de fer à souder

Vous le trouverez chez les revendeurs de fers à souder.

Scie à main miniature

Mon modèle préféré est la scie X-Acto #15 et son manche support. Les scies x-Acto #234 ou #239, de plus grande taille, conviendront également à la découpe des plaques perforées. Vous pourrez en trouver, ainsi que des modèles similaires, dans les magasins de modélisme, ou chez crd, sans oublier eBay.

Outil à ébavurer

Ces outils ne sont pas toujours disponibles dans les magasins de bricolage, mais vous les trouverez chez amz, eby, crd ou sel, ainsi que chez de nombreux autres revendeurs.

Ces outils sont en général prévus pour être utilisés par les droitiers. Des outils pour gauchers existent, mais sont parfois difficiles à trouver. Certaines lames sont prévues pour des matériaux durs ; la lame E300 est spécialement prévue pour les métaux tendres et les plastiques.

Pied à coulisse

J'apprécie les pieds à coulisse de la marque Mitutoyo, mais il existe des modèles plus économiques qui seront suffisants pour un usage quotidien. De nombreux amateurs préfèrent les pieds à coulisse munis d'un cadran digital, pouvant passer des mesures métriques aux mesures en pouces. Personnellement, je préfère les modèles ne nécessitant pas de pile.

Pinces crocodiles en cuivre

Économiques, vous pourrez les trouver chez les revendeurs de composants électroniques comme crd, dgk, mou et bien d'autres.

Fournisseurs

Voici les adresses Internet des principaux fournisseurs cités dans cet ouvrage. Chaque nom est précédé par une forme abrégée de trois lettres, qui est utilisée tout au long de ce chapitre.

ada Adafruit <https://www.adafruit.com/>

ainsi que leurs revendeurs français :

amz Amazon <https://www.amazon.fr/>

bri Bricorama <http://www.bricorama.fr/>

ainsi que de nombreux magasins locaux.

cas Castorama <http://www.castorama.fr/store/>

ainsi que de nombreux magasins locaux.

crd Conrad <http://www.conrad.fr/ce/>

cyc Les Cyclades <https://www.cyclades-elec.fr/>

ainsi que le magasin 11 boulevard Diderot 75012 Paris.

dgk Digi-key <http://www.digikey.fr/>

eby eBay <http://www.ebay.fr/>

far Farnell <http://fr.farnell.com/>

got Go Tronic <http://www.gotronic.fr/>

lex Lextronic <http://www.lextronic.fr/>

mou	Mouser Electronics	http://www.mouser.fr/
mit	Mitutoyo	http://mitutoyo.fr/fr_fr/
nor	Norauto	https://www.norauto.fr/
ainsi que de nombreux magasins locaux.		
rsp	Radio Spares	http://fr.rs-online.com/web/
sel	Selectronic	http://www.selectronic.fr/
ainsi que les magasins de Paris et Lille.		
spk	Sparkfun	https://www.sparkfun.com/
ainsi que leurs revendeurs français.		
sup	supermagnete.fr	https://www.supermagnete.fr/
tay	Tayda Electronics	https://www.taydaelectronics.com/

De nombreux tutoriels et guides sont proposés par ces différents sites. En les consultant, vous obtiendrez des informations nombreuses et très utiles.

D'une manière générale, si vous le pouvez, ne négligez pas de faire des recherches en langue anglaise, ni de consulter les sites anglophones des fournisseurs, ou se trouvent souvent des informations plus complètes et plus diversifiées.

Index

A

- adaptateur
 - à tension de sortie unique 93
 - secteur 93
 - universel 93
- afficheur
 - à LED 170
 - à sept segments 136, 170, 305
- aimant au néodyme 235
- alarme 154
 - anti-intrusion 123
- alimentation
 - de laboratoire 94
 - secteur 93
 - symbole 54
- Ampère, André-Marie 16
- ampère 14
- anode 128
- antenne 257
- appareil à fréquences radio 223
- Arduino 261
 - compilation 269
 - déconnexion 271
 - EDI 263
 - environnement 273
 - mise en œuvre 264
 - téléversement 269
 - test du clignotement 266
 - Uno 262
- auto-induction 241

B

- barrette de connexion 101, 302
- bascule bistable 207
- BASIC Stamp 289

- batterie
 - au lithium 12
 - de voiture 12
- bibliographie 228
- bloc d'alimentation 226
- bobine 231, 239
- boîte de rangement 224
- boîtier 163
- Boole, George 182
- bouton-poussoir 50, 190
 - symbole 55
- bouton poussoir DPDT 136
- breadboard 62
- buzzer 66
- buzzer piézoélectrique 259

C

- Camenzind, Hans 145
- capacité 1, 67
- capteur magnétique 124, 136
- cathode 128
- cavalier 43
- chaleur 114
 - transfert 106
- cheval-vapeur 30
- circuit
 - asynchrone 210
 - intégré 133, 134, 136, 133
 - intégré 4026B 171
 - intégré programmable 271
 - recherche des erreurs 68
 - synchrone 210
- CMOS 185
- code binaire 213
- code secret 189
- coffret 297
- commutation 39

- composant
 - liste 296
 - recherche en ligne 291
- compteur
 - binaire 211
 - décimal 171
- condensateur 47, 67, 70, 241
 - charge 70, 74
 - chargement 235
 - constante de temps 72
 - électrochimique 68
 - électrolytique 68
 - en céramique 68
 - symbole 68
- conducteur 9
- connecteur d'alimentation 100
- cordon
 - de mesure 96
 - de test 5
- coulomb 35
- courant 13
 - alternatif 14, 15, 77, 242
 - continu 15

D

- dés magiques 211
- diagramme de Venn 183
- diélectrique 67
- différence de potentiel 23
- diode 6, 101, 128
 - au germanium 304
 - de protection 129
 - symbole 55
- DIP 134
- dissipation thermique 115
- diviseur de tension 82

E

eau déionisée 301
écouteur à haute impédance 304
électricité 33
électrolyte 12
électromagnétisme 16, 223
électron 10, 33
électronique audio 223
espace de travail 223
étiquetage 225

F

farad 67
Faraday, Michael 67, 70
fer à souder 94, 101
 crayon 95
 de faible puissance 305
 support 97
 universel 306
fil
 à plusieurs brins 45
 à souder 98
 chauffant 28
 d'antenne 304
 de câblage 42, 296
 de pontage 43, 63, 296
 de test 306
 souple 296
filtre passif 249
formule de Wheelers 230
fournisseur 306
fourniture
 liste 296
Franklin, Benjamin 34
fusible 5
 destruction 14

G

gaine thermorétractable 99, 196
générateur de tension 231
grip-fil miniature 306

H

haute tension 257
haut-parleur 47, 91, 236, 243

historique 237
henry 230
Henry, Joseph 231
hertz 148
hystérésis 276

I

inductance 229, 242, 255
intensité 13
 mesure 24
interrupteur 49, 124
 à glissière 135
 à lames 51
 à levier 45, 301
 à transistor 78
 DPST 49
 rebond 206
 SPDT 49
 SPST 49
 symbole 53
 tactile 45, 79, 301

J

jauge américaine 41
jonction de deux fils 101
joule 30, 35

K

kilowatt 30

L

LED 113
 à basse consommation 300
 allumer 18
 basse puissance 135
 chaleur 113
 fiche technique 27
 symbole 55
 variations de luminosité 22
LM7805 180
logique 179, 182
loi d'Ohm 26, 27
loupe grossissante 95
lumière pulsée 115

lunettes de sécurité 4

M

magnétisme 228
Marconi, Guglielmo 260
matériel de dessoudage 306
mégaohm 8
méga watt 30
microcontrôleur 261, 289
 programmable 223
microfarad 67
milliampère 14
millivolt 14
milliwatt 30
mini plaque d'essais 42
mode astable 146
modulo 214
montage en parallèle 26
montage en série 26
multimètre 1
 connecteur 7
 gammes automatiques 3
 réglage 7
 surcharge 24

N

nanofarad 67
newton 35
Noyce, Robert 136

O

ohm 8
 table de conversion 8, 14
Ohm, Georg Simon 11
ordinateur 228
oscillateur à relais 62
oscilloscope 226
outil à ébavurer 98

P

PDIP 134
pédale d'effet 253
PICAXE 271, 289
picofarad 67

pied à coulisse 98
 pile 16, 10
 alcaline 12
 citron 32
 connecteur 300
 court-circuit 11
 fabrication 31
 génération de chaleur 12
 support 302
 symbole 54
 pince
 à bec pointu 40
 à dénuder 41, 305
 coupante 40, 305
 coupante de précision 40, 305
 plate à becs allongés 305
 plate allongée 39
 pinces crocodiles 99
 pistolet à air chaud 108, 96
 plaque
 à bus double 42
 à bus simple 42
 de montage 41, 62, 64, 301
 de prototypage 42
 d'essais 42
 plaque perforée 99
 cuivrée 297
 non cuivrée 297
 recherche des erreurs 163
 point de soudure 107
 pôle négatif 34
 pôle positif 34
 pompe à dessouder 97
 porte
 AND 182
 logique 181, 188
 NAND 181, 184
 potentiel électrique 35
 potentiomètre 5
 ajustable 46, 81, 301
 intérieur 20
 symbole 55
 test 21
 puissance électrique 31

R

radio 255
 récepteur 260

randomisation 280
 recherche des erreurs 163
 régulateur de tension 93, 136, 179
 relais 45, 56, 84, 192
 à verrouillage automatique 126
 résistance 6, 11, 241
 code couleur 17
 eau 11
 en parallèle 26
 en série 26
 langue 9
 symbole 54
 valeur 20
 variable 20
 vérification 19

S

schéma de circuit électrique 52
 scie à main 98
 miniature 308
 Scribner, Charles E. 51
 semi-conducteur 83
 Shockley, William 84
 son 65, 89, 146
 déformation 249
 distorsion 251
 écrêtage 252
 fréquence 148, 238, 242
 onde 247
 théorie 238
 sonde logique 133
 soudage
 historique 104
 soudure 102, 105, 94
 circuit 160
 erreurs à éviter 104
 idées reçues 103
 sur plaque perforée 162
 source d'alimentation
 câblage 108
 support de circuit intégré 135
 symbole en électronique 53
 synthétiseur 85
 système métrique 120

T

temporisateur 303

mode astable 148
 temporisateur 555 137
 historique 145
 impulsions parasites 143
 mode bistable 144
 mode monostable 142
 spécifications 145
 tension 13, 12
 test du bout du doigt 79
 testeur de réflexes 167
 thermistance 274, 273
 tournevis 39
 transistor 47, 79, 83, 84, 301
 base 80
 bipolaire 80, 83
 collecteur 80
 émetteur 80
 NPN 80, 83
 PNP 80, 83
 PUT 88
 tresse à dessouder 97
 troisième main 95, 95
 TTL 185
 tweeter 249

U

unités de mesure
 conversion 120
 historique 120

V

variable incontrôlable 10
 vérification de continuité 51
 visserie 297
 volt 14, 35
 Volta, Alexandre 12, 16

W

watt 30, 35
 table de conversion 30
 Watt, James 31
 webographie 227
 woofer 249
 wrapping 104

Remerciements

J'ai découvert l'électronique grâce à mes camarades d'école Patrick Fagg, Hugh Levinson, Graham Rogers et John Witty. Nous étions *geeks* avant même que le mot existe.

C'est Mark Frauenfelder qui m'a ensuite poussé à redevenir un *maker*. Gareth Branwyn a rendu possible *L'électronique en pratique* et Brian Jepson en a permis la suite. Ce sont les trois meilleurs éditeurs que j'ai connus, et ils sont également trois de mes meilleurs amis. Tous les auteurs n'ont pas cette chance.

Je suis également reconnaissant envers Dale Dougherty d'avoir initié un mouvement que je n'aurais jamais imaginé devenir si important et de m'avoir accueilli comme contributeur.

Russ Sprouse et Anthony Golin ont réalisé et testé tous les circuits. Le contenu technique a été vérifié par Philipp Marek, Fredrik Jansson et Steve Conklin. Ne les blâmez pas si des erreurs subsistent dans ce livre : il m'est beaucoup plus facile d'en commettre qu'aux autres de les déceler !

À propos de l'auteur

Charles Platt a commencé à s'intéresser aux ordinateurs en 1979, lorsqu'il s'est acheté un Ohio Scientific C4P. Après avoir conçu des logiciels et les avoir vendus par correspondance, il a enseigné le BASIC, MS-DOS, puis Adobe Illustrator et Photoshop. Au cours des années 1980, il a écrit cinq livres d'informatique.

Il est aussi l'auteur de romans de science-fiction, tels que *The Silicon Man* et *Protektor*. Il a arrêté d'en écrire quand il a commencé à collaborer au magazine *Wired* en 1993, avant d'en devenir, quelques années plus tard, l'un des principaux rédacteurs.

Charles Platt a contribué au magazine *MAKE* dès le troisième numéro et il est maintenant un éditeur de cette revue. Aujourd'hui, il conçoit et développe des prototypes d'équipement médical dans son atelier, situé dans l'environnement sauvage du nord de l'Arizona.