

# Composants électroniques

## Table des matières

1. Composants actifs.....	2
1.1. Introduction.....	2
1.2. Transistor.....	2
1.3. Les ponts en H.....	5
1.4. Les régulateurs linéaires.....	7
1.5. Les ampli-op.....	8
1.5.1. Comparateurs.....	8
1.5.2. L'ancêtre, la série 74.....	8
2. Composants passifs.....	9
2.1. Les Diodes.....	9
2.1.1. Les diodes électroluminescentes ou DEL.....	9
2.1.2. Les diodes classiques.....	10
2.2. La résistance.....	11
2.2.1. Seule.....	12
2.2.2. À plusieurs.....	14
2.2.3. Avec des circuits CMOS.....	15
2.2.4. En capteur.....	15
2.2.5. Multi-boutons.....	16
2.2.6. Comment choisir les valeurs.....	16
2.3. Les condensateurs.....	17
2.3.1. Alimentation.....	17
2.3.2. Seul.....	18
2.3.3. Parasite.....	19
2.3.4. Les supercapas.....	20
2.3.5. À plusieurs.....	20
2.3.6. Filtre.....	20
2.4. Les bobines.....	21
2.4.1. Seule.....	22
2.4.2. Réservoir d'énergie.....	22



# 1. Composants actifs

## 1.1. Introduction

Dans un circuit numérique, il y a toujours une dose d'analogique à l'interface avec le monde extérieur. Les composants discrets, dits actifs, sont à base de transistors et, dans le cadre d'un système numérique, permettent de manipuler la puissance (les signaux forts) ou d'amplifier les signaux faibles des capteurs.

Fondamentalement, il n'y a pas vraiment de différence entre les technologies MOS des microcontrôleurs et celle des transistors de puissance. C'est toujours du MOS. Sauf qu'une des technologies permet de conduire plus de courant, à plus haute tension, tout en dissipant mieux la chaleur.

## 1.2. Transistor

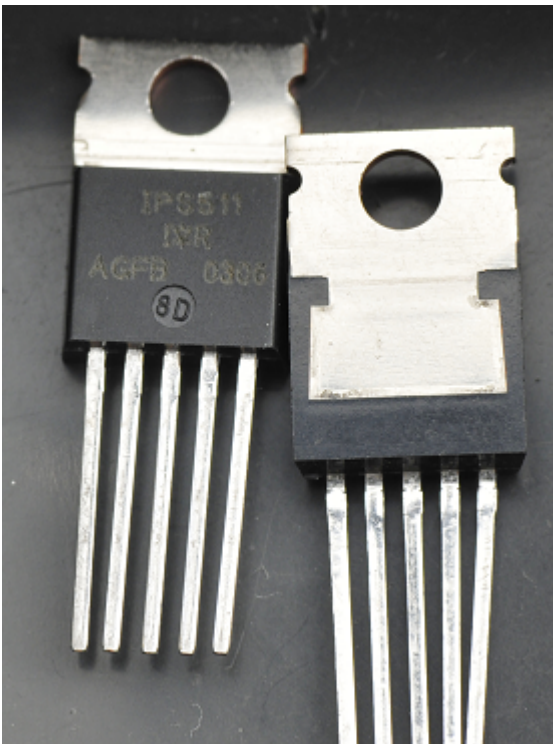
Dans un transistor, une « grille » ou une « base » permet de contrôler ce qui passe entre le collecteur et l'émetteur, ou le drain et la source, à l'image d'une vanne sur un tuyau.

Il existe principalement 2 types de transistor : la technologie **bipolaire**, et la technologie **MOS** (Metal-Oxyde Semiconducteur). Dans le bipolaire, la grille injecte un peu de courant entre le collecteur et l'émetteur. Dans un MOS, la grille est posée sur un oxyde de silicium parfaitement isolant, c'est le champ électrique qui fait l'effet de tunnel pour faire passer les charges entre le drain et la source. Les charges restent sur la grille. L'absence d'injection de charge change tout, au niveau de la consommation électrique.

Un transistor MOS fonctionne en stockant des charges sur sa base qui laisse, ou non (c'est la différence entre NPN et PNP), passer le courant entre le drain et la source. La quantité de charge nécessaire pour faire fonctionner la vanne du transistor est vue comme une capacité parasite, que l'on retrouve notamment dans tous les circuits intégrés.

Ces capacités sont à vider et à remplir, elles sont donc responsables de la consommation dynamique des circuits intégrés. On retrouve aussi cette capacité parasite en bien plus grand sur les entrées de circuit, car les transistors des pad sont beaucoup plus gros (de l'ordre du pF).

Les transistors sont d'une grande variété, au delà des type MOS et bipolaire. Par exemple, il existe des transistors dits intelligents, qui se coupent si leur température est trop élevée au lieu de griller. Il s'agit de transistors avec une logique de commande intégrée.



Transistor 5A avec protection thermique et commande utilisant une tension compatible avec de la logique 5V.

Les transistors MOS ont une résistance interne très faible (« RdsON ») lorsqu'ils sont passants. Cette faible résistance implique une faible consommation d'énergie ( $P = R \times I^2$ ). Si la résistance est faible le transistor revient à un fil connecté à la "charge". Si la résistance est forte, cela revient à un fil coupé. Dans les deux cas, la puissance dissipée dans le transistor est minime.

L'énergie est perdue surtout lors des phases de transition coupé/passant : le transistor passe alors d'une résistance faible à une résistance forte par rapport à la charge, ce qui implique une consommation transitoire.

Les transistors consomment lors de leur changement d'état, c'est le succès de la technologies CMOS qui ne consomme presque rien en statique.

Lors du choix d'un transistor de puissance, la résistance interne va déterminer sa consommation statique. Un « RdsON » de 10 mΩ et un courant de 10 A donne une consommation de 100 mW. L'autre caractéristique importante est la vitesse de commutation du transistor passant/coupé, qui va de quelques dizaines de μs à quelques ns. Souvent, un transistor très rapide dispose d'un « RdsON » plus grand qu'un transistor plus lent. Si la grille est plus grande alors elle offre une résistance plus faible au canal, mais expose une capacité plus grande qu'il est plus long de remplir. Vous pouvez toujours associer deux transistors de types différents, l'association se comportera comme deux résistances en série : le transistor rapide conduira plus de courant, et limitera la consommation dans les transitions, tandis que le transistor lent conduira majoritairement en phase statique.

La capacité de dissipation thermique change en fonction du boîtier et de la présence ou non d'un radiateur. Cette résistance s'exprime en °C par Watt. En connaissant la température maximum du composant, on en déduit la puissance maximum que l'on peut dissiper dans le composant. Il est question ici uniquement des pertes dans le transistor.

Il peut être intéressant d'utiliser un composant dont les pattes sont courbées à 90° afin de visser le transistor au PCB (la carte) sur une petite zone de cuivre qui jouera ainsi le rôle de dissipateur thermique. La carte sera plus grande, mais plus solide qu'avec les composants simplement fixés par

les soudures. Il faut également faire attention au fait que la partie métallique d'un transistor est souvent reliée à une de ses pattes : attention au court-circuit, surtout si plusieurs composants sont fixés au même radiateur. Il existe des pastilles isolantes électriquement mais conductrices de chaleur (ce qui va rarement de pair, les bons conducteurs de chaleur étant souvent de bons conducteurs de courant).

La rapidité de commutation, et leur faible consommation, en font un composant important pour le « hachage » : la création d'un signal carré dont la valeur moyenne peut être contrôlée en faisant varier la période coupée par rapport à la période passante (PWM, ou pulse width modulation : modulation de largeur d'impulsion). On peut envoyer un tel signal directement à un moteur à courant continu. Ou encore le passer dans un filtre passe-bas LC pour obtenir une tension continue : c'est un des montages de base d'une alimentation à découpage (montage dit step down).

En cas d'usage pour un moteur, la fréquence de hachage est fixée autour de 10 à 20 kHz — voire un peu plus pour ne plus être dans les fréquences audibles (le sifflement peut être pénible). Certains moteurs, peu coûteux, peuvent ne pas tourner avec une fréquence de plus de 100 Hz. Le très faible nombre de spires de ce genre de moteur ne permet pas de stocker assez d'énergie pour lisser la tension reçue.

Les transistors MOS peuvent être pénibles à mettre en œuvre, car la commande doit pouvoir atteindre la tension d'alimentation pour saturer complètement le transistor. Dans un système 24 V, avec un circuit de commande à 5 V (ou 3,3 V, voire moins), il faut un ou des composants « drivers de MOS » qui ont pour fonction de monter la tension de 5 V à la tension d'alimentation des transistors, et de fournir assez de courant pour aller assez vite. En effet, plus le transistor peut conduire de courant, plus la capacité d'entrée parasite est importante. Si la commande est trop lente, en ne fournissant pas assez de courant à la grille du transistor de puissance, celui-ci bascule plus lentement et sa consommation ainsi que son échauffement augmentent. Cette augmentation peut devenir non négligeable, jusqu'à le griller.

Les « Hexfet » (du fabricant « International Rectifier's ») sont des sortes de transistors MOS qui ont un avantage énorme : leur bascule a lieu vers 1,5 V, quelle que soit la tension d'alimentation. Cela permet de les relier directement à un microcontrôleur, sans drivers. Cela en fait des commandes parfaites pour des moteurs dont ne veut pas changer le sens de rotation, ou pour des LED de puissance. Il me semble que ce genre de composant est utilisé pour les alimentations de CPU pour PC (1,8 V jusqu'à 100 A, ce n'est pas commun)

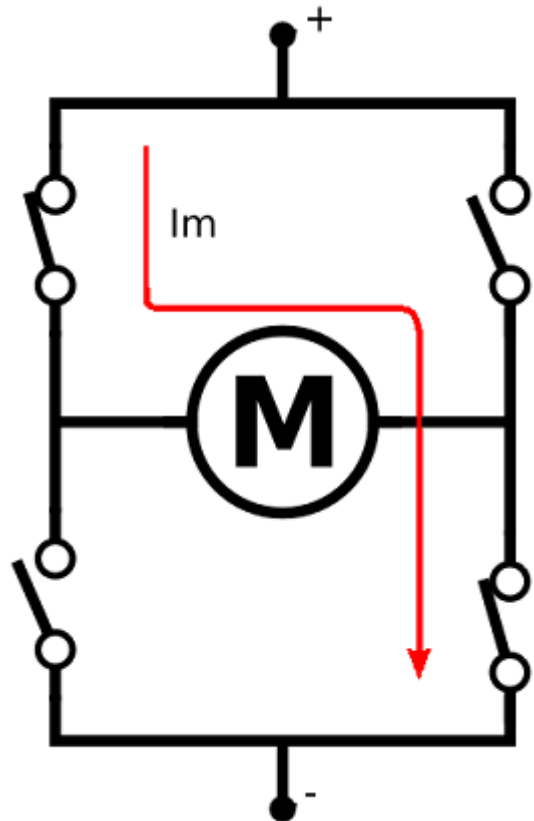
Il faut savoir qu'un transistor fonctionne facilement jusqu'à 30 V. Mais le courant est rapidement limité à 3 voir 5 A. Si vous utilisez une batterie 6 V pour un robot, il sera plus facile, pour doubler la puissance des moteurs, de passer à une alimentation 12 V que de doubler le courant acceptable par la commande du moteur. Il est aussi possible de « doubler » le composant en mettant les transistors en parallèle, qui agissent ainsi comme un transistor deux fois plus gros.

Dans le cas d'une commande par un microcontrôleur, il faut faire attention à la mise sous tension, ainsi qu'à l'état de la sortie de la broche de commande reliée à une base. Au reset, la broche peut être en entrée, donc avec un potentiel flottant, ou en sortie haute ou basse. Cela peut provoquer des consommations ou des activations non voulues. Si le code d'initialisation n'est pas assez rapide et que la puissance est alimentée en même temps que la logique, une pull-up ou une pull-down feront l'affaire.

### 1.3. Les ponts en H

Le pont en H est une structure utilisant 4 transistors pour faire tourner un moteur dans les 2 sens, avec une commande de hachage (par exemple un PWM d'un microcontrôleur) et 2 pins de contrôle de sens ou de freinage).

Un composant intégré est bien plus compact que son équivalent discret (donc plus fiable, plus facile et rapide à mettre en œuvre, etc.). Souvent les ponts en H discrets sont préférés, pour avoir des courants jusqu'à 20 A.



Pour les cas de robots mobiles de la taille de ceux de la coupe de France de Robotique, le moteur industriel typique est le Maxon RE25 de 20 W qui demande 1,5 A continu sous 24 V. Deux moteurs de ce genre peuvent faire bouger rapidement (50 cm/s) un robot de 10 kg avec un réducteur d'environ 18. 20 A, même sous 12 V, est nécessaire à un moteur de presque 10 fois plus de puissance.

Il ne faut pas oublier, qu'il est plus simple de passer de 12 V à 24 V que de trouver un pont en H qui supporte 2 fois plus de courant. Il est rare de trouver un pont en H intégré qui supporte plus de 5 A, 3 A étant le plus courant.



Pont en H 4A/48V/100Khz/0,3Ω

Les moteurs vus à la Coupe de France de robotique étaient des moteurs courant continu (à balais). La vitesse de rotation est proportionnelle à la tension, et le courant électrique proportionnel au couple.

Dans l'industrie, ces moteurs sont remplacés par des moteurs synchrones, plus petits, plus fiables (plus de balais qui frottent), beaucoup plus puissants. Mais leur commande est plus complexe, il y a minimum 3 phases sur 3 fils : trois signaux sinusoïdaux ou carrés décalés (comme le triphasé). La vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence. La tension et l'intensité donne le couple maximum.

Les ponts en H intégrés ont pu avoir une mauvaise réputation, car certains modèles grillaient souvent (L298). Il ne faut jamais oublier, que les moteurs génèrent des parasites (ceux qui font des étincelles, entre autres). Par construction, à chaque mise à zéro et « allumage » ou « extinction » du courant par le transistor de commande, le moteur qui est composé de bobines, renvoie une haute tension en retour (par exemple 100 V). Il faut donc protéger correctement le pont avec des diodes transil ou Schottky. Ils absorbent bien plus de courant en coupant les hautes tensions, que les diodes internes du pont en H, si elles existent. Il ne faut pas oublier non plus le petit condensateur céramique (10 nF) aux bornes du moteur. Celui-ci court-circuite les hautes fréquences parasites.

Certains ponts en H contiennent une sortie « sens », correspondant au bas du pont en H, pour permettre de mettre une résistance de puissance de faible valeur, pour mesurer le courant, ou directement la masse. Avec une résistance de 0,1 ohm, un courant de 1 A, générera une tension de 0,1 V lisible par un convertisseur analogique numérique. Certains ont remarqué que la présence de ce genre de petite résistance de puissance protégeait le pont. Elle doit sans doute absorber un reliquat de parasites, qui ne l'est plus par le pont. Une telle résistance sera une résistance de puissance de 1, 5 ou 10 W. Si la résistance est de trop petite dimension, elle va trop chauffer, sa résistance interne va augmenter, et donc avec elle, la tension à ses bornes, laissant peu de puissance au moteur.

Il ne faut pas oublier, non plus, le courant de démarrage, quand le moteur part du point mort, ou que celui-ci est bloqué. Le courant peut monter à une dizaine d'ampères dans le cas du RE25, ce qu'un pont en H intégré ne peut fournir que brièvement avant coupure ou destruction.

Pour fournir plus de courant qu'un seul composant ne peut fournir, on peut en mettre 2 en parallèle. J'ai déjà mis en parallèle 3 puces, qui génèrent un PWM de puissance, pour une alimentation à



découpage. Il faut limiter au maximum la distance entre les composants, pour éviter les effets inductifs des pistes, ce qui pourrait fausser la répartition de courant en haute fréquence ( $> 1$  MHz). Les hautes fréquences sont générées par les fronts très droits, ce qui est souhaitable pour avoir la transition la plus rapide.

Les ponts en H intégrés ont principalement 4 entrées de contrôle, un pour chaque transistor. Souvent, un demi-pont est connecté à une sortie PWM d'un microcontrôleur, et les 2 autres sont connectés à des I/O classiques pour déterminer le sens du courant. Il existe aussi des PWM couplés sur certains microcontrôleurs. Ce genre de couplage permet de gérer une « dead band », un moment où tout est coupé. Cela empêche la phase de court-circuit, typique des inverseurs CMOS, lorsque les 2 transistors sont passants lors des transitions.

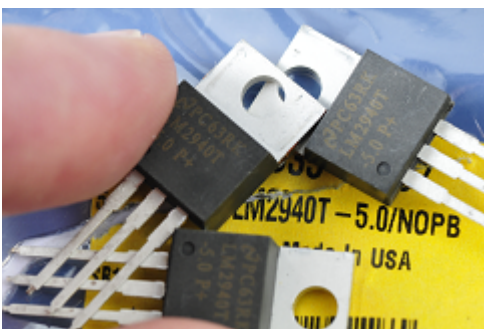
Il peut y avoir aussi des séries de 3 PWM sur certains microcontrôleurs. Il s'agit d'une fonctionnalité dédiée pour gérer des moteurs synchrones qui utilisent 3 phases pour les 3 pôles du moteur.

## 1.4. Les régulateurs linéaires

Il s'agit d'un composant tripode intégré, qui utilise un transistor en mode linéaire, pour réguler une tension fixe de sortie.

Le plus connu est le 7805 qui fournit du 5 V et dont le rendement est faible. Dans le cas d'un 7805 qui fabrique du 5 V, à partir de 12 V, pour un courant de 1 A :  $12 - 5 = 7$  V de perdus,  $P = 7 \times 1 = 7$  W, perdus en chaleur, pour  $5 \times 1 = 5$  W « utiles ». Le rendement est donc de 41 %, ce qui est mauvais. Et il faut de plus prévoir la dissipation de chaleur en conséquence. Il peut être intéressant de mettre une résistance de puissance en amont du régulateur qui dissipera une partie de la puissance. Par exemple avec 2 ohms, 2 W seront dissipés, en provoquant 2 V de chute de tension avant d'arriver au 7805.

Il faudrait avoir une faible différence entre la tension d'entrée et la tension cible, pour avoir un rendement plus intéressant. Technologiquement, il faut une différence minimum de 1,2 V, entre les 2 tensions. Il existe des régulateurs « low drop out » avec une différence minimum de 0,6 V, mais il faut faire attention à leur condition d'instabilité (leur sortie peuvent osciller en l'absence de condensateur de filtrage). Dans le cas d'une batterie 6 V, avec un régulateur 5 V « low drop out » de 0,6 V de chute, on a un rendement de 83 %, ce qui n'est pas mauvais du tout.



Régulateur linéaire LDO 5V/1A

Ce genre d'alimentation est très simple à mettre en œuvre : un composant à 3 pattes plus une ou deux capacités de découplage. Il est aussi excellent pour filtrer le « bruit » d'alimentation, celui d'un moteur, ou d'une alimentation à découpage en amont. C'est parfois utilisé pour l'audio, avant d'alimenter l'amplificateur.

Dans le cas de courant très faible (1 mW), il peut être plus intéressant d'utiliser un régulateur linéaire, qu'une alimentation à découpage. En effet, celle-ci consomme toujours un peu d'énergie, pour son fonctionnement interne. Dans le cas de très basse consommation ( $< 1$  mA), on peut arriver

au même ordre de grandeur que les besoins du circuit principal. Ainsi le rendement de l'alimentation à découpage tombe sous les 50 %, ce qui peut rendre le régulateur linéaire plus intéressant.

Il existe aussi des montages spécifiques, pour transformer un régulateur linéaire en source de courant (le courant bouge moins, lorsque la tension bouge). Cela fait une meilleure source de courant qu'une résistance, pour une LED par exemple.

## **1.5. Les ampli-op**

Le net regorge de schémas à base d'amplificateurs opérationnels (ampli-op). Un tel circuit permet tout un tas de fonctionnalités et correspond à l'inverse de la fonction de rétroaction (en mode linéaire).

La fréquence maximale, la précision de la sortie est dépendante de la qualité de l'ampli-op.

Le montage suiveur permet de « mettre de la distance » (entre 2 cartes par exemple) entre un phénomène physique à mesurer, et un convertisseur analogique numérique. Le suiveur fournit autant de courant que nécessaire sur la liaison. Il permet aussi de se faire des sondes d'oscilloscope actives, à très peu de frais. Une sonde active d'oscilloscope de quelques GHz coûte autour de 1000 €, un ampli-op rapide coûte quelques euros.

Il faut faire aussi attention aux ampli-op CMOS de conception ancienne, dont certains peuvent avoir un offset de sortie non négligeable. Dans le cas d'ampli-op de précision, il faut se rappeler que le bruit dans l'alimentation se retrouve, en partie, dans la sortie. Il faut pouvoir bien la découpler avec une capacité de découplage, une self de choc, voire un convertisseur linéaire dédié.

Dans le cas d'un montage amplificateur, il est parfois salvateur de rajouter une petite capacité (10 pF), entre l'entrée et la sortie. Cela crée un filtre passe-bas qui enlève le bruit à haute fréquence qui n'intéresse pas le montage, et cela augmente sa stabilité.

### **1.5.1. Comparateurs**

Les comparateurs peuvent être comparés à un amplificateur opérationnel ne fonctionnant qu'en mode saturé. L'avantage est que leur temps de basculement est plus rapide que pour un ampli-op de prix équivalent.

Les comparateurs les plus rapides ont des sorties collecteur ouvert. La tension d'alimentation acceptable peut être centrée autour de 5 V ou, au contraire, être beaucoup plus large (3 à 15 V). Cela a l'énorme avantage de pouvoir utiliser directement une batterie sans régulation ou alimentation spécifique (pas de perte, pas de parasite, montage plus petit, plus fiable, etc.).

### **1.5.2. L'ancêtre, la série 74**

La série 74 définit des circuits DIP contenant des portes logiques simples. Le 74LS00 est par exemple une porte NAND. Les premiers Cray ont été construits avec ce genre de technologie. Elle paraît aujourd'hui totalement obsolète en électronique numérique. Il peut être intéressant d'utiliser leur capacité de conduire beaucoup de courant, par rapport aux technologies plus récentes. Le 74LS06 contient 6 inverseurs MOS pouvant sortir 20 mA par broche, soit de quoi alimenter des diodes de signalisation. On peut aussi lier les 6 entrées/sorties, pour gérer plus de 100 mA.



## 2. Composants passifs

### 2.1. Les Diodes

Une diode est un dipôle (un bipède électronique), qui a un sens de branchement. Elle existe sous plusieurs formes, avec une tension de référence, à partir de laquelle, le courant qui la traverse peut s'envoler, la tension restant fixe, et la diode se comporte presque comme un fil.

#### 2.1.1. Les diodes électroluminescentes ou DEL

Les DEL, plus connue sous leur dénomination anglophone LED, pour Light Emitting Diode, ont pour fonction de servir de voyant ou d'éclairage. Si l'on dispose d'une LED pour signaler une carte sous tension, cela évite de rechercher un problème, alors que l'alimentation est simplement coupée.

Les LED ont une tension nominale entre 1,2 V et 3,6 V (et non 0,6 V), 2,4 V étant la valeur la plus courante, cela varie selon leur technologie. L'avantage des versions à 3,6 V, est que cela correspond à la tension de 3 piles rechargeables ( $3 \times 1,2 = 3,6$  V). Avec ce genre de piles, on peut se passer de résistances qui servent habituellement à fixer le courant. L'intensité, dans une LED, est une fonction exponentielle à la tension à ses bornes. Si l'on dépasse 4 V, il y a de fortes chances de la détruire très rapidement, si l'alimentation peut fournir assez de courant.



La LED va être de plus en plus brillante au fur et à mesure que la tension monte, jusqu'à la tension de seuil où le courant va s'envoler. Dans le sens inverse, la tension à ses bornes va monter mais aucun courant ne passe.

Les LED puissantes chauffent, jusqu'à pouvoir se détruire, comme les LED laser, malgré le respect du courant maximal. Il leur donc faut un bon radiateur. On a toujours la puissance  $P = U \times I$ , donc si I s'envole, la consommation aussi. Une partie de l'énergie est changée en chaleur.

Les rendements lumineux « important » (en candela par watt), concernent les LED les moins lumineuses, malheureusement. Mais cela change tous les jours.

Lors du choix d'une LED, pour servir d'éclairage, faites attention aux différentes grandeurs physiques indiquées : les candelas (cd) ou les lumens (lm). Une candela est la vraie valeur de puissance lumineuse. Le lumen est une mesure de puissance lumineuse par unité d'angle (candela par stéradian). En gros, vous pouvez avoir une LED avec un nombre de candelas faible, mais un nombre de lumens élevé, car la LED a un faisceau lumineux très étroit (15°, par exemple). Souvent, les vendeurs mettent en avant le nombre le plus avantageux. Rarement celui qui vous intéresse.

Une LED a l'avantage de pouvoir s'allumer et s'éteindre rapidement. Tellement rapidement qu'elles sont utilisées, pour éclairer des scènes en s'allumant uniquement pour chaque image d'une caméra vidéo, comme si l'on déclençait un flash pour chaque image. Cela permet d'économiser de l'énergie et d'éclairer moins fort la scène (pour un humain). Cela permet également de diminuer le courant moyen dans la diode (le courant maximal pic est plus élevé que le courant moyen maximal).

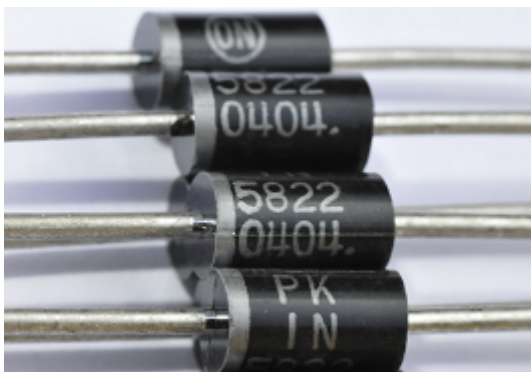
Le même genre de fonctionnement est utilisé pour les télévisions à rétro-éclairage à LED, celles-ci s'éteignent durant la transition entre deux images, pour améliorer la fluidité et la qualité de la vidéo.

## 2.1.2. Les diodes classiques

Le but d'une diode est d'interdire un sens au courant. Les diodes parfaites n'existent pas, la tension typique « de blocage » est de 0,6 V. Il existe des diodes à 0,2 V, mais avec une « pente » moins franche (le courant augmente moins vite, lorsque la tension augmente).

Il y a aussi une valeur de puissance acceptable, que la diode peut dissiper, comme pour les résistances. Cette puissance se calcule toujours avec  $P = U \times I$ . Avec une tension de 0,6 V, une diode qui laisse passer 10 A consomme 6 watts.

Il y a une autre caractéristique peu connue : le temps de recouvrement. Une diode pour se bloquer, a besoin de transférer des charges, et pendant ce temps-là, elle est passante. Si une diode est censée couper de la haute fréquence, elle ne pourra pas le faire si elle est trop lente. Il existe des diodes dites Schottky qui sont rapides et font souvent l'affaire.



Diode Schottky avec tension inverse à 40 V, 3 A en moyenne, 80 A en pointe, 500 ns de temps de recouvrement.

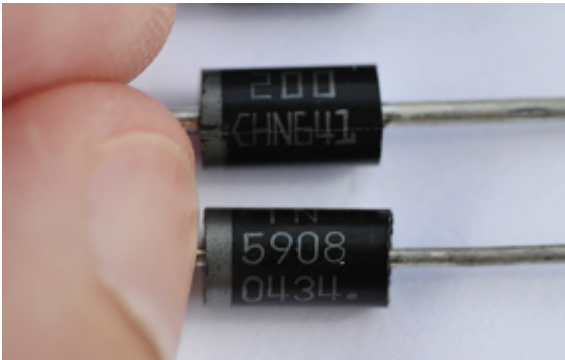


Diode Schottky avec tension inverse à 45 V, 20 A en moyenne, 1 800 A en pointe, 500 ns de temps de recouvrement.

L'utilisation typique est une protection. On peut faire en sorte qu'un branchement de câbles à l'envers provoque un court-circuit, qui est coupé par un plomb ou l'équivalent. Si on branche la diode en série, ou en pont redresseur, il ne faut pas oublier la perte de 0,6 V, ce qui représente plus de 10 % de la tension à 5 V, ce qui n'est pas forcément négligeable du point de vue perte d'énergie, simplement pour faire un détrompeur.

Une diode rapide est très utile, en tant que « diode de roue libre ». Ce genre de diode absorbe l'énergie rejetée par un moteur, lorsque le transistor de commande est coupé ( $i = 0$ ). Le moteur se comporte alors comme une bobine, et envoie son énergie sous la forme d'une haute tension, qui peut détruire le transistor de commande. Ce pic peut monter à 100 V (pour un moteur 12 V) et être de très courte durée. Tellement courte qu'il faut faire attention à utiliser le bon calibre, pour les observer à l'oscilloscope.

Elles se rajoutent aussi en protection d'un pont en H intégré, car les diodes internes sont limitées par la taille du boîtier, du point de vue de la quantité d'énergie absorbable. Un moteur de quelques €, surtout les puissants (du type voitures télécommandées) génèrent beaucoup plus de pics de tension parasite, qu'un moteur avec un gros bobinage (plus de 100 € le moteur de qualité industrielle).

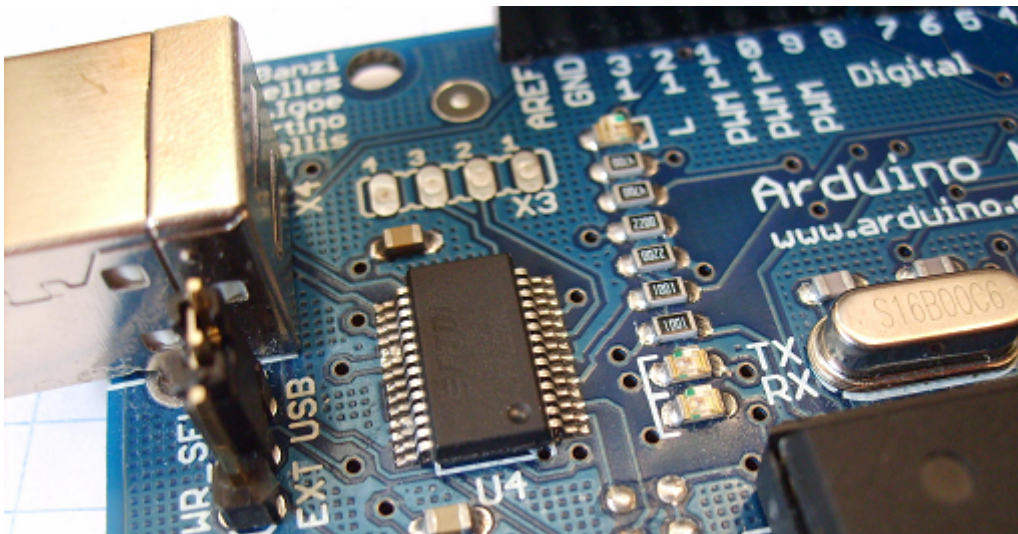


Diode Transil avec une tension inverse à 5 V et un temps de réaction de 1 ns, 1 500 W (max) avec un courant supérieur à 100 A.

Il existe aussi les diodes Transil et diodes Zener, qui disposent de deux tensions de seuil : 0.6 V et une autre. La diode Transil est plus rapide qu'une diode Zener. Le but est d'empêcher qu'une tension monte au delà de 5 ou 8 V, par exemple. Le but est toujours de couper les surtensions en créant un court-circuit avec la masse pour protéger un circuit plus sensible, comme un transistor. Si cela dure trop longtemps et/ou que la diode chauffe trop, cela peut aller jusqu'à sa destruction. Il faut prévoir un plomb ou une varistance. Si la diode est détruite, la tension est appliquée sur les composants qui sont censés être protégés, parfois une résistance est ajoutée en série pour partager la puissance à dissiper.

## 2.2. La résistance

Si on veut utiliser un microcontrôleur pour un projet de robotique ou de domotique, on doit parfois créer sa propre carte numérique, ou créer une carte de périphérique, connecté à une carte numérique plus dense comme l'Arduino ou la Raspberry Pi.



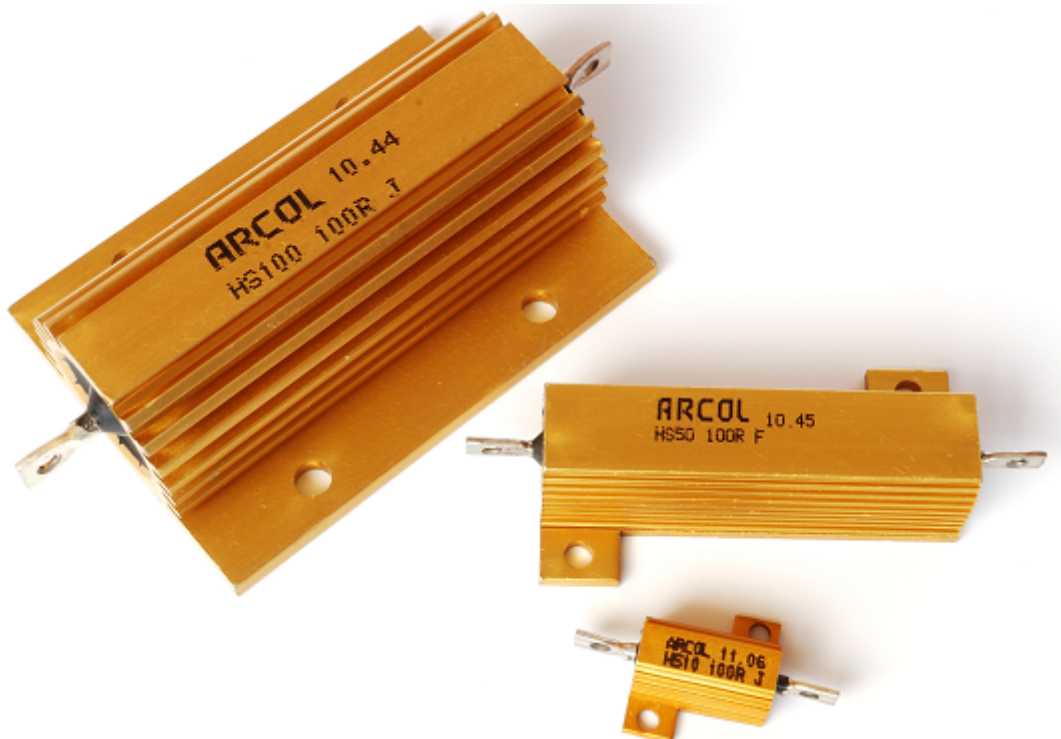
Une résistance est un bipède, qui n'a pas de sens de branchement, en théorie, mais aussi en pratique. Sa grandeur principale se mesure en ohms ( $\Omega$ ). Elle va de quelques dixièmes d'ohms (m $\Omega$ ) à quelques gigaohms (G $\Omega$ ). La petite équation bien connu est  $U = R \times I$ .

Elle décrit une relation entre la tension (qui est un potentiel comme la gravité) qui traverse la résistance, et le courant (qui est un flux, un débit). C'est comparable à une chute d'eau sur un torrent. Si la rivière est large (résistance faible), le courant est fort, si la rivière est étroite (résistance forte), le courant est faible. La hauteur de la chute représente la tension aux bornes de la résistance.

Une résistance transforme de l'énergie électrique en énergie thermique. Ce mode de fonctionnement

permet de lier le courant et la tension. Un peu comme si la pente d'une chute d'eau permettait d'estimer la hauteur, en regardant le débit, ou à estimer le débit, en connaissant la hauteur de la chute.

La puissance typique d'une résistance traversante est le quart de watt, cela veut dire que la résistance ne peut pas dissiper plus que cette énergie, sans être abîmée. Les petites résistances CMS (composant monté en surface) peuvent être encore plus fragile. Il existe des grosses résistances, de plus de 10 cm de long, insérés dans des radiateurs en métal, qui supporte la dissipation de plusieurs dizaines de watt.



La définition de l'énergie électrique consommé (la puissance) est  $P = U \times I$ , quel que soit le composant électronique. Donc on a  $P = R \cdot I^2$  ou  $P = U^2/R$  pour une résistance. Selon l'application, on pourra calculer facilement la puissance dissipée maximum.

Cette formule permet de comprendre pourquoi sur un amplificateur audio dont la tension est fixée (environ 30V pour un ampli "100W"), la demande de puissance est plus forte avec des haut-parleurs 4 Ω que 8 Ω ( $P = U^2/R$  donc la demande de puissance est doublé). Ou à l'inverse l'emploi de haut parleur 4 Ω permet de limiter la tension de l'amplificateur, tout en gardant la même puissance, comme dans les voitures, qui ont une batterie 12V.

Ou comprendre pourquoi, un casque audio hifi de 600 Ω a besoin d'un ampli « plus puissant » qu'un casque de 32 Ω. En fait, il a besoin d'une tension plus élevée, pas de plus de « puissance ».

Le code couleur classique a un peu évolué avec l'augmentation de précision disponible. Un chiffre est ajouté sur certaine résistance sous forme d'un anneau de couleur de plus, et il existe des grades de précision de 1% et moins (0,01% existe).

### 2.2.1. Seule

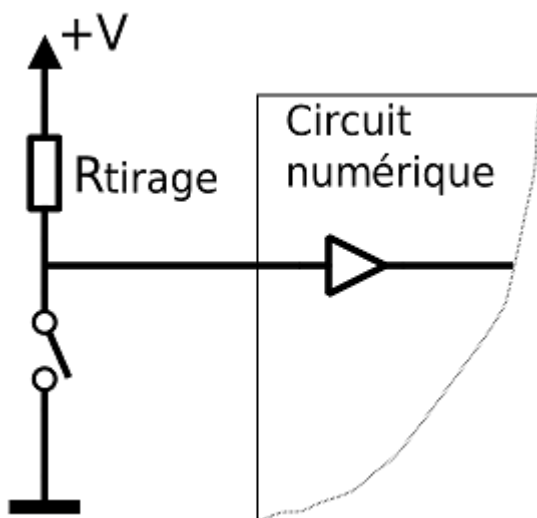
Une grosse résistance peut être vue comme un générateur de courant.  $U = R \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{U}{R}$  si U



varie cela donne  $i = \frac{U}{R} + \frac{\Delta U}{R}$ , plus R est grand moins l'intensité varie avec une modification de la tension.

On les voit souvent dans les alimentations de LED dont le fonctionnement nominal est spécifié en ampère (20mA typiquement). Mais c'est une mauvaise alimentation car de l'énergie est perdue en chaleur, le "rendement" est faible.

Cela permet de mettre une tension sur un fil qui est normalement coupé, ou en court-circuit comme avec un interrupteur. Un circuit ouvert (ou "haute impédance") a peu de sens dans la communication avec du numérique, il faut une tension (la tension d'alimentation, zéro ou une tension intermédiaire dans le cas de l'usage d'un convertisseur analogique numérique). S'il y a une connexion par la résistance entre le fil et la masse, on appelle cela une "pull down", et si la connexion a lieu entre le fil et le "+" du circuit, on appelle cela une "pull up".



Une résistance permet aussi d'imposer une tension de "rappel" sur un fil, "pull" en anglais.

Au repos, l'entrée est à la tension d'alimentation. Quand l'interrupteur est fermé, l'entrée est mise à la masse et la résistance consomme du courant. On voit bien que si la résistance est faible, elle va consommer beaucoup de courant, jusqu'au court-circuit entre l'alimentation et la masse. Ce genre de résistance est typiquement de 10 ou 100 kΩ voir plus, pour limiter cette consommation.

Dans une carte comportant un convertisseur analogique numérique et un capteur comme une photodiode, le courant généré par le capteur peut être très faible. Dans le cas d'une liaison analogique, le signal (ici, la tension) est donc sensible aux perturbations électromagnétiques (le 50hz du secteur, un moteur à courant continu, une alimentation à découpage, etc.). Si on rajoute une résistance de pull sur la carte numérique, on force de la consommation électrique dans la liaison, ce qui diminue l'influence du « bruit ». Comme la photodiode ne peut pas fournir ce courant, il faut rajouter un amplificateur opérationnel en mode suiveur sur la carte capteur. Il réplique exactement la tension, en fournissant tout le courant demandé. Si on ne met pas de résistance, le courant est toujours faible et la tension vu par la carte numérique, peut fluctuer, car les entrées ont une impédance très élevée, et donc une perturbation de faible énergie peut modifier la tension présentée aux entrées.

Avec la résistance, le câble de liaison entre les 2 cartes, même s'il fait antenne, ne devrait pas être perturbé le signal qu'il porte sous forme de tension.

Une résistance en série permet de limiter le courant en cas de court-circuit. Imaginez une connexion série qui sort directement d'un microcontrôleur ; vous prévoyez un connecteur avec la masse, et les

2 fils de transmission série (Rx et Tx, de la norme RS232, celle que vous avez sur les vieux PC, où l'on pouvait brancher un modem). Si jamais le microcontrôleur émet, et que le fils d'émission est en contact avec la masse, il y a un court-circuit. L'intensité est maximale, et la « pin » de sortie du microcontrôleur fini par griller.

Si on rajoute une résistance de 100 Ω, en série du fils d'émission entre le microcontrôleur, et le connecteur, en cas de court-circuit, la résistance se retrouve entre les 2. Sur un circuit 5V, on a  $5V/100\ \Omega = 10\ \text{mA}$  soit l'ordre de grandeur maximum de ce genre de technologie (entre 35 et 5 mA, et 15 le plus souvent). La pin ne pourra jamais griller.

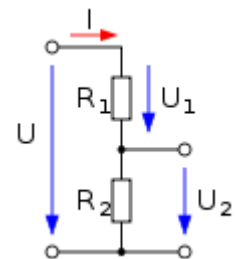
### 2.2.2. À plusieurs

Les montages en série ou en parallèle sont assez connus. Dans le cas en série, les 2 valeurs de résistances s'additionnent. Dans le cas parallèle, c'est plus compliqué mais si les 2 valeurs sont identiques, cela revient à diviser par 2 la résistance ( $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ).

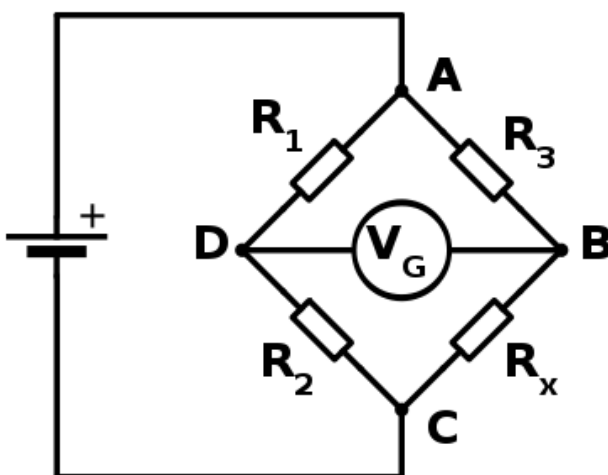
Il faut savoir qu'une résistance qui grille a sa résistance qui augmente : cela peut sauver un circuit. Ainsi, sur un montage sensible, si une résistance grille, elle augmente jusqu'à aller jusqu'au circuit ouvert (coupé). S'il y a 2 résistances en parallèles, la deuxième peut prendre le relais.

Utiliser 2 résistances permet aussi d'obtenir des valeurs exotiques, ou augmenter par 2, l'énergie que l'on peut consommer.

Le montage en diviseur de tension peut être utile pour avoir une tension particulière à disposition. Il s'agit de 2 résistances séries entre la masse et l'alimentation, dont on récupère le point milieu. La tension est due à une égalisation du courant entre les résistances ( $V = V_{\text{alim}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ ). C'est une mauvaise alimentation car si on consomme trop de courant, la tension tombe. Elle tombera d'autant plus vite que les résistances sont fortes, car trop peu de courant circule dans R2.



Ce montage est utile, par exemple, pour mesurer la tension d'une batterie 12V avec un microcontrôleur alimenté en 5V. Il suffit de diviser la tension par 2.4. Le microcontrôleur pourra mesurer la tension sans voir jamais plus de 5V à ses bornes. Le courant est ici très faible, ce qui n'influence donc pas la mesure.



Le pont de Wheatstone permet de mesurer précisément une résistance inconnue à l'aide d'autres résistances.  $R_x = \frac{R_3}{R_2 \cdot R_1}$  quand il n'y a pas de courant qui circule entre le point D et B. On peut le mesurer par un galvanomètre. On peut aussi s'en servir pour mesurer de faibles variations de résistance d'une résistance variable, ou encore de faibles variations de consommation électrique d'un composant qui est vu au premier ordre comme une résistance; par exemple, une puce de carte à puce, pour faire de l'analyse de consommation (SPA, DPA).



### 2.2.3. Avec des circuits CMOS

Dans le cas de circuit sensible, par exemple, équipé d'ampli-op de précision, on veut pouvoir protéger ces circuits d'une surtension. Si la consommation est faible, on peut ajouter une résistance faible en série entre l'alimentation et la pin d'alimentation du circuit. En cas de surtension, une partie de l'énergie sera absorbée par la résistance et cela le protège.

Les pull up et pull down sont utilisés pour fixer une valeur sur les entrées numériques non utilisées. En effet, sans connexion, la valeur du pad d'entrée change au gré des perturbations électromagnétiques, et à chaque passage du seuil, le transistor interne bascule et cela entraîne de la consommation électrique inutile, voir sa destruction, si cela part en oscillations incontrôlées.

Les composants CMOS modernes peuvent avoir des pads complexes. Les entrées ont de très fortes valeurs de résistances internes (consommation donc très faible) et une capacité parasite toujours plus faible. Cette capacité est à "remplir" pour faire basculer la tension d'entrée. Cela détermine la vitesse de la connexion possible et la consommation électrique associée.

Ses pads comportent parfois des résistances de pull intégré. Il ne faut donc pas rajouter une pull up, en plus d'une pull down interne. Cela crée un diviseur de tension, qui au mieux, fait consommer inutilement le circuit.

Il faut faire aussi attention aux puces, dont la majorité des pins sont mises en sorties au reset pour éviter justement, le problème lié aux entrées libres qui bagotent. La sortie est ensuite configurée en entrée par une routine d'initialisation. Si une résistance de pull est présent, la puce va fournir du courant inutilement avant l'initialisation. Cela paraît évident, mais ce n'est pas forcément une information facile à avoir sur un circuit de plusieurs centaines de pins.

Les transmissions numériques basiques à base de signaux "carrés", présentes des "fronts" très raides. Ces fronts représentent des changements rapides entre les 2 tensions. Ses fronts sont donc composés de fréquences très élevées, qui peuvent rayonner ensuite dans le reste du système. Ce changement rapide de tension implique aussi un pic de courant pour remplir la capacité parasite de l'entrée numérique. Si on rajoute une résistance en série sur une telle connexion, cela crée un filtre passe-bas avec la capacité parasite de l'entrée. En effet, la présence de la résistance limite le courant qui peut être envoyé pour remplir la capacité parasite, ainsi la tension monte plus lentement, le front est moins raide et les fréquences utilisées plus faibles. Cela permet aussi de limiter les appels de courant, dans l'alimentation général.

Les appels de courant sont les pointes de consommation de l'électronique CMOS. Une telle technologie consomme peu en statique mais beaucoup en dynamique surtout au niveau des entrées/sorties. Je parle des technologies accessibles aux hobbyistes, et non des derniers core i7, où la consommation de fuite devient prépondérante.

Un tel appel de courant peut venir d'IO numérique de "puissance", qui communique rapidement à distance.

### 2.2.4. En capteur

En robotique ou domotique, on cherche à avoir des informations du monde extérieur. Les capteurs sont rarement parfaits, et on est toujours à la recherche d'éléments fiables et peu coûteux.

Pour relier le capteur au système, je conseille d'utiliser le plus souvent des entrées convertisseurs analogique au lieu de pures entrées numériques, si cela peut éviter la création de montage complexe de détection de seuil, de comparateur ou de comparateur à hystérésis, qui ne seront même pas programmable. Ces montages impliquent souvent des amplis-op, des composants passifs et des

potentiomètres pour régler les seuils.

En rentrant le plus vite possible dans le monde numérique, il est possible de faire des anti-rebonds et des seuils complexes de façon logiciel. Le changement d'état d'un interrupteur n'est jamais propre, il fournit une oscillation, appelé "rebond", qui pourrait être interprété comme plusieurs mouvements au lieu d'un seul.

Un potentiomètre est une résistance variable mécanique montée en pont diviseur et relié à un convertisseur analogique numérique d'un microcontrôleur. La valeur numérique lue est proportionnelle à l'angle de l'axe.

Un doigt de métal se déplace sur un morceau de matériaux résistant (graphite). Il existe des boîtiers multi-tours, plus précis. Pour les plus courants, la tige de sortie ne fait pas un tour complet. Cela peut être un bon moyen de faire un capteur d'angle.

J'en ai utilisé pour seconder des servomoteurs dans un robot. Un servomoteur force pour faire respecter sa consigne mais, quand il ne peut pas la respecter, le robot doit le savoir. Ce genre de capteur est précieux, car peu sensible aux perturbations, peu coûteux (par rapport aux roues codeuse), facile à mettre en œuvre et assez précis.

La précision de la mesure provient du montage mécanique, mais aussi de la précision du potentiomètre lui-même. Il est possible de mesurer les valeurs extrêmes du potentiomètre et ne pas prendre comme référence sa valeur nominal. L'idée est que la variation de l'erreur dans le temps est faible, par rapport à l'erreur de base elle-même (dû aux moyens de fabrication).

Par contre, de part la nature mécanique du montage et du frottement, un tel système ne doit pas être très durable.

### 2.2.5. Multi-boutons

Il est possible de lire l'état de 6 boutons avec une seule entrée convertisseur analogique/numérique. En mettant en série 8 résistances, on crée un grand diviseur de tension (0V, 1V, 2V, 3V, 4V, 5V par exemple). Chaque bouton poussoir met en contact un des points de l'échelle. La lecture de la valeur de la tension mesurée donne le bouton pressé. Par contre, on ne peut détecter qu'un seul bouton appuyé à la fois.

Il est possible de détecter plusieurs boutons avec une échelle "R2R", qui est aussi utilisée pour faire des convertisseurs numérique analogique. L'idée est d'avoir une échelle de tension comme 0, 2.5V, 1.25V, 0.625V (avec des poids de résistance multiple de 2n). Même avec ces tensions additionnées, on peut retrouver quels boutons sont appuyés. Par exemple, si on lit 1.875V, cela ne peut être que la connexion de 1.125V+0.625V.

La limite typique est autour de 8, ensuite, il y a un problème de précision des résistances ( $2^8 = 256$  soit une précision de 1/256 ce qui revient à une précision inférieure à 1% pour chaque résistance).

### 2.2.6. Comment choisir les valeurs

Les résistances ne sont jamais parfaites. Il y a toujours des effets inductifs parasites, tout comme un fil. Cet effet inductif est faible donc cela ne se voit qu'à haute fréquence (signal de fréquence bien au-delà du MHz).

Cela veut dire qu'une résistance voit sa valeur résistive augmenter avec la fréquence. Cette inductance parasite dépend en gros de la taille de l'élément, plus il est gros, plus l'effet est présent.

Plus le courant est important et varie fortement, plus l'effet se fait sentir également (  $U = I \cdot \frac{dL}{dt}$  ,

la tension aux bornes de la bobine est proportionnel aux variations de courant, et à l'inductance parasite).

Comment choisir la valeur des résistances quand on a le choix ? On cherche à diminuer la consommation du circuit (augmentation des valeurs), diminuer l'influence de parasites (diminution des valeurs).

Évitez d'avoir 36 valeurs différents pour une même carte, permet de gérer une liste de composants plus petite, il existe des "séries" de valeurs, plus ou moins courantes et donc + ou – chère.

## 2.3. Les condensateurs

Un condensateur est un bipède, qui a un sens de branchement la plupart du temps, selon la technologie employée, contrairement à la théorie. Sa grandeur principale se mesure en farads (F). Elle va de quelques picofarads (pF) à quelques centaines de farads (F).

La petite équation est  $I = C \cdot \frac{dU}{dt}$ , l'intensité est proportionnelle aux variations de tension, ou  $Q = C \cdot U$ , la quantité de particule électrique stocké (en Coulomb), est proportionnel à la tension et la capacité.

Les capacités, les capas, les condensateurs, sont des petites réserves d'énergie incontournables, sur une carte d'électronique numérique. On peut les voir comme des barrages, ou des réservoirs d'eau sur un torrent. La taille du réservoir est proportionnelle à sa capacité.

Une capacité a une limite de tension maximale. Elle est aussi victime d'une résistance parasite (ESR), en série, plus ou moins importante. C'est un facteur limitant du courant maximum, qui la traverse. Un peu comme si la sortie d'un réservoir d'eau avait une largeur plus ou moins importante. Cette résistance parasite augmente souvent, avec la taille du composant, et avec la tension maximale tolérée. Pour une valeur et un modèle de condensateur donné, augmenter la tension maximale à un coût et réduit son courant maximum.

Les condensateurs céramiques ont une capacité plus faible, mais aussi une résistance parasite plus faible que les condensateurs dit chimiques. Parfois, on peut lire sur un schéma une valeur comme  $0.1\mu\text{F}$ , pour qualifier un condensateur, à la place de 100 nF, pour signifier que la résistance parasite n'a pas besoin d'être faible.



### 2.3.1. Alimentation

L'alimentation des circuits numériques pourrait nécessiter un article à lui tout seul. Les composants numériques simples disposent en général d'une patte d'alimentation. Les éléments analogiques,

comme les amplificateurs opérationnels, peuvent supporter jusqu'à 15V en symétrique (+15V/-15V). Les tensions d'alimentation des composants numériques diminuent avec la finesse de gravure MOS, pour des questions de consommation électrique et de tension de claquage interne, qui diminue aussi. On est passé ainsi de 5V à 3.3, 2.5V, et jusqu'à 0.9V. Intel annonce même du 0.5V.

La patte du boîtier est reliée à la puce en silicium, par un fil d'or. Il constitue une inductance parasite (chute de tension en cas d'appel de courant fort). Les nombres des pattes d'alimentation augmentent ainsi, avec la consommation du circuit. En général, on considère qu'une patte ne peut consommer que 1A, avant que la chute de tension, dû aux fils, ne soit problématique. C'est pour cela que les puces gourmandes ont plusieurs centaines de pattes d'alimentation.

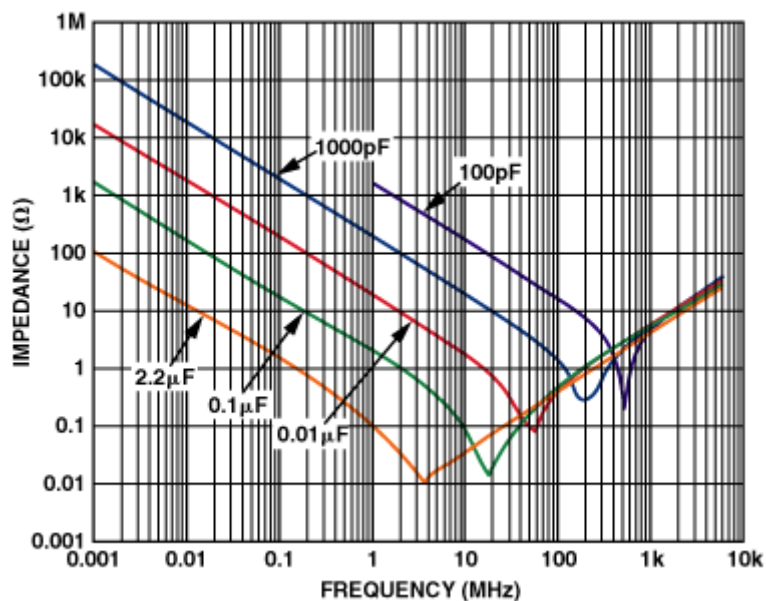
Pour les tensions de 2.5V, et moins, la tension peut être jugé trop faible pour faire des IO correctes : compatibilité TTL/CMOS/LVDS, immunité au bruit, etc. C'est pourquoi, on peut retrouver deux tensions différentes pour le même circuit. L'un pour le cœur du circuit, l'autre pour ses entrées-sorties.

### 2.3.2. Seul

Les condensateurs de découplage sont des composants, typiquement de 100nF, que l'on met le plus proche possible des pattes d'alimentations des composants CMOS.

Il s'agit de fournir une réserve d'énergie pour absorber les appels de courant, dû aux commutations des transistors. Comme les appels sont très brefs, et donc à haute fréquence (celle de l'horloge), les pistes d'alimentation sont très perturbées par l'inductance parasite des fils. C'est pour cela que ces condensateurs doivent être proches du composant protégé, pour réduire la longueur des pistes.

Il faut faire attention aux gros condensateurs, qui ne sont pas capables de fournir des courants intenses rapidement, car plus la capacité est grande plus la résistance augmente. Cela implique que pour les composants CMOS, les plus rapides, il faut fournir des capacités plus faibles, pour contenir la résistance parasite. C'est aussi pour cela que les composants rapides, disposent de plusieurs lignes d'alimentation séparées. Et chaque ligne doit être découplée. La taille idéale de la capacité dépend de la fréquence de fonctionnement.



Ce graphique montre l'impédance d'un condensateur en fonction de la fréquence de fonctionnement du circuit. Il permet de choisir un condensateur, en fonction de la fréquence des signaux.

Il n'est pas rare d'avoir plusieurs condensateurs de tailles différentes, pour une même patte d'alimentation. Les plus petits seront les plus proches du circuit.

Un circuit numérique avec une tension trop basse a un comportement erratique, qui peut faire osciller ses IO, et donc consommer fortement. Cela arrive notamment lors de la mise en route d'un circuit avec 2 tensions, si l'une des tensions monte trop lentement. Heureusement, le problème est de mieux en mieux maîtrisé au niveau des puces.

Dans les systèmes avec plusieurs tensions, il peut y avoir un ordre de mise en route à respecter, avec une pente précise de la tension d'alimentation, dans le but de limiter ces appels de courant.

Une baisse, même faible, de tension peut perturber un convertisseur analogique numérique, qui utilise l'alimentation, comme point de référence. Cela peut être un problème difficile à trouver, car la baisse de tension est locale. C'est pour cela que les tensions de références des convertisseurs sont souvent indépendantes des lignes d'alimentation.

Les capacités de découplages servent à palier aux problèmes de courants transitoires d'une puce, mais elles sont aussi à l'origine d'un courant d'appel violent, à la mise sous tension.

Il n'est pas rare qu'une alimentation d'un équipement électronique voit 1F comme charge capacitive totale. Certains gros systèmes démarrent leurs sous-modules en séquences décalées, pour éviter le problème.

C'est le problème de "l'inrush current", qui est la pointe de courant à l'allumage du système, quand toutes les capacités de découplage se chargent d'un coup.

Cette pointe de consommation peut mettre l'alimentation en protection. Cela peut provoquer une remise à zéro, reset qui provoque, à nouveau, un pic d'appel de courant. Et cela recommence.



Pour les puces denses, il est plus simple de poser les condensateurs par en dessous.

### 2.3.3. Parasite

L'entrée d'un composant MOS correspond à la grille d'un transistor. Cette grille peut être vue comme une capacité. La valeur de cette capacité est en général de quelques pF. Pour faire varier la tension d'entrée, il faut remplir ou vider cette capacité. La quantité de courant qu'il est possible de fournir, donne la vitesse maximale de variation.

Sur les circuits rapides, cette capacité diminue, elle est dépendante de la finesse de technologie utilisée (taille de la grille du transistor). Vider et remplir cette capacité explique aussi pourquoi la technologie CMOS consomme surtout lors des commutations, et consomme moins avec les technologies plus fines.

### 2.3.4. Les supercapas

Il existe depuis quelques années des composants, appelé super-capacité, qui ont vocation à remplacer des batteries dans certaines applications. Il s'agit de capacités presque normales de 1, 10 F ou plus. Elles ont souvent une tension maximale assez limitée, qui oblige à les mettre en série.

Elles ont aussi une résistance parasite assez grande, qui limite l'intensité maximale. C'est un domaine en pleine évolution. En l'an 2000, on parlait du volume d'un bureau, ( $> 1 \text{ m}^3$ ) pour une capacité de 1F.

### 2.3.5. À plusieurs

Un montage série de capacité fait baisser la capacité totale (comme pour les résistances parallèles). Cela peut être un moyen de contourner la tension maximale, d'un seul composant.

Les capacités s'additionnent en parallèles. En général, on met de grosses capacités en sortie d'une alimentation pour fournir de la puissance aux IO, et plus on se rapproche des composants, plus les capacités seront petites, pour qu'elles "réagissent" plus rapidement.

Une méthode, pour créer de la haute tension, est de charger une ligne de capacités branchées, en parallèle, puis de toutes les brancher en série. Mises en série, les tensions de chaque capacité s'additionnent.

### 2.3.6. Filtre

Un filtre RC est un filtre du premier ordre. On peut considérer que c'est un "mauvais" filtre, car sa « pente » est (trop) douce, et rejette lentement les fréquences non désirées. Il est courant de voir des filtres d'ordre 8. La fréquence de coupure est de  $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$ , ou l'inverse pour avoir une constante de temps.

Un filtre du premier ordre a d'autres avantages : la phase du signal est moins modifiée, et surtout il est stable. Il n'y a pas de point de fonctionnement, qui peut renvoyer une tension inverse, qui pourrait faire osciller tout un système. Dis plus simplement, les cas où cela ne marche pas, sans savoir pourquoi, sont plus rares.

Il existe pas mal de montages qui fonctionnent mieux avec une capacité rajoutée "par-dessus". Il s'agit souvent de faire un filtre passe-bas, pour supprimer les plus hautes fréquence qui peuvent perturber le schéma (amplification, rétro-action,...).

Dans le cas du filtre passe bas, la tension est convertie, par une résistance en courant, qui remplit le condensateur. Plus la résistance est grande, plus le remplissage est lent, idem si le condensateur est gros.

Un filtre passe-bas est nécessaire devant un convertisseur analogique numérique, si vous voulez reconnaître le signal lu. Sinon vous risquez l'aliasing. Parfois une simple résistance série suffit, le filtre se fait avec la capacité parasite d'entrée. Sans ce genre de filtre, vous pouvez lire n'importe quoi, y compris des parasites hautes fréquences.

L'addition d'une résistance série, à côté d'une capacité de découplage d'une alimentation revient à un filtre passe bas, qui permet de filtrer du bruit haute fréquence dans l'alimentation, utile dans le cas de montage de précision.

Une capacité en série sur un fil, agit comme un filtre passe haut (une capacité est passante en haute fréquence). Par contre, il faut faire attention de prendre une capacité qui fonctionne dans les 2 sens



de polarité. Ce genre de filtre est notamment utilisé après les amplificateurs audio pour supprimer la composante continue, qui peut abîmer les haut-parleurs.

De la même façon, une petite capacité (100 pF et supportant la haute tension), connecté aux deux bornes d'un moteur, permet de filtrer le bruit généré, par celui-ci, en court-circuitant les hautes fréquences.



## 2.4. Les bobines

Une bobine est un dipôle, qui n'a pas de sens de branchement. Sa grandeur principale se mesure en henry (H), dont le nom est hérité du physicien américain Joseph Henry. Elle va de quelques picohenry (pH), à quelques henry (H). La petite équation est  $U = L \times \frac{di}{dt}$ .



Pour se rappeler de l'équation, il suffit de se souvenir que des personnes se sont amusées à brancher des bobines sur le secteur, par exemple, un transformateur 5 V mis à l'envers (un transformateur est composé de deux bobines ou plus, qui partagent leur champ magnétique). Ils sont morts en débranchant le système, ce qui provoque un énorme arc électrique. En effet, le courant passe d'une valeur fixe à zéro en une fraction de seconde, la dérivée du courant est très grande, ce qui produit une très grande tension qui fait « claquer » l'air, c'est-à-dire que, comme pour un éclair, l'air devient conducteur (à partir de 3,6 kV/mm sous air sec, moins avec de l'humidité ambiante).

On peut remarquer que si un condensateur « intègre », une bobine « dérive » le courant. Il y a une dualité entre les deux composants.

Les bobines sont composées d'enroulement d'un fil, autour d'un cœur. La valeur d'inductance dépend du nombre de spires (de tours de fils) et de la matière du cœur.

L'enroulement est fait en fils de cuivre, moins résistant électriquement que l'aluminium. Si le fil est fin et avec beaucoup de spires, la résistance série parasite n'est plus négligeable.

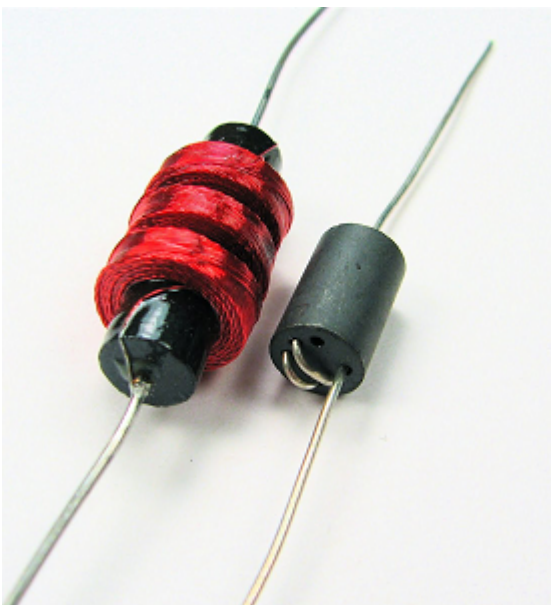
Le matériau magnétique permet d'augmenter  $L$ , l'inductance, sans augmenter le nombre de spires, par rapport à une bobine « à air ». Mais au contraire de l'air, ces matériaux « saturent ». Arrivé à un certain niveau de courant électrique, la valeur  $L$  s'écroule, et la bobine se comporte comme une simple résistance. Les bobines à air ne saturent pas, mais sont bien plus grandes, pour avoir la même valeur d'inductance et, évidemment, la résistance série parasite augmente avec la taille de la bobine.

Pour certains circuits de précision, il peut être utile d'utiliser une grosse bobine à air pour pouvoir comparer le résultat avec la bobine définitive plus petite.

Il existe deux formes physiques : le plot ou le tore. Le plot peut être plus facile à placer sur un circuit imprimé, mais il rayonne plus (produit plus de parasites) qu'un tore.

### 2.4.1. Seule

La self, comme on dit en anglais, de choc ou d'arrêt est un moyen de filtrage de parasites. Un moteur génère toujours des tensions parasites plus ou moins fortes. Même si les alimentations sont séparées, la masse est commune. Or les parasites peuvent aussi passer par là. Mettre une bobine de choc, pour relier les masses évitent d'avoir des réinitialisations intempestives d'un microcontrôleur, par exemple (vécu).



La plus petite ci-contre vaut environ 1 € et supporte jusqu'à un courant de 1 A.

Deux bobines dites « de chocs », utilisées comme anti-parasites.

Sur certains câbles, comme les câbles USB, on peut voir un gros bloc plastique, qui a une fonction similaire.

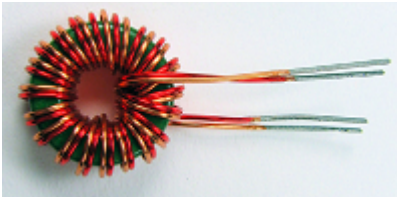
### 2.4.2. Réservoir d'énergie

Le principe de certaines alimentations à découpage est de générer un signal carré, dont la valeur

moyenne est la tension recherchée. Ce genre d'alimentation utilise le fait que les transistors MOS ne consomment presque pas d'énergie, quand ils sont passants ou saturés.

Ensuite, il faut filtrer la sortie pour ne récupérer que cette moyenne, ou la « très basse fréquence », qui est la tension recherchée. Si l'on filtre avec un classique filtre RC, une grosse partie de l'énergie partira en chaleur dans la résistance. Un filtre LC filtre sans dissiper l'énergie (hors résistance série parasite). Les deux éléments L et C stockent l'énergie à des moments différents.

Il est question d'éléments de puissance, les fils de la bobine doivent être assez gros pour limiter les pertes ohmiques.



Bobine torique utilisée comme réserve d'énergie.

Sur l'image, le fil est doublé pour diminuer la résistance.

Il peut être compliqué de trouver des bons cœurs magnétiques, ou de trouver le câble de 2 mm, protégé par un vernis, typique des applications dans le domaine de puissance qui intéresse un hobbyiste (1 à 100 W). Mais il est plaisant d'avoir sa propre alimentation, à une tension peu commune, pour fournir 6 V sous 20 A pour des servomoteurs branchés sur une batterie 12 V, par exemple.