

# L'électronique de zéro

Par Basil1402 ,  
olyte ,  
Polinichon  
et uknow



[www.openclassrooms.com](http://www.openclassrooms.com)

*Licence Creative Commons 6 2.0  
Dernière mise à jour le 2/12/2012*

# Sommaire

Sommaire .....	2
Lire aussi .....	3
L'électronique de zéro .....	5
Partie 1 : [Théorie] Bases et notions élémentaires .....	6
Présentation et mise en garde .....	6
Présentation .....	6
Pourquoi choisir d'apprendre l'électronique ? .....	6
Risques de l'électricité sur le corps humain .....	8
Les effets du courant électrique sur le corps humain .....	8
Comment s'en protéger ? .....	10
Responsabilité : qui ? .....	10
L'électricité .....	11
Analogie .....	12
La source d'énergie .....	12
Le générateur .....	12
Le récepteur .....	13
L'essentiel .....	13
Le courant .....	14
Les charges électriques .....	14
La notion de conductibilité .....	16
Sens du courant .....	16
Intensité du courant .....	18
Notions avancées : l'intensité, ça se calcule ! .....	20
La tension .....	21
La masse : une référence .....	23
Notion de référentiel .....	23
La masse .....	23
La puissance .....	24
Effet joule .....	24
Puissance .....	25
Application .....	27
Lecture et écriture d'un schéma .....	27
Un peu de vocabulaire .....	27
Courant et tension .....	28
Branchement en série et en parallèle .....	28
Les générateurs .....	30
Générateurs continus .....	31
Générateurs non continu .....	32
Générateurs périodiques .....	33
Les formes connues de signaux .....	34
Les récepteurs .....	36
Les récepteurs passifs .....	37
Les récepteurs actifs .....	37
Lois fondamentales .....	37
Introduction .....	38
La loi d'Ohm .....	39
La loi des mailles .....	39
La loi des nœuds .....	41
Généralités et énoncé de la loi .....	41
Application à un circuit électrique : .....	41
Exercice d'application .....	43
Partie 2 : [Théorie] Les composants fondamentaux passifs de l'électronique .....	46
Les composants électroniques .....	47
« Que vont-ils bien pouvoir nous raconter ? » .....	47
Quelques définitions .....	47
Et ça ressemble à quoi, concrètement ? .....	48
C'est fini ? .....	52
Actifs ou passifs ? .....	52
Les composants passifs .....	52
Des composants actifs .....	53
Les composants passifs fondamentaux .....	53
Introduction aux régimes .....	54
La notion de régime .....	54
Les différents régimes .....	55
Notre régime de travail .....	55
Le spectre d'un signal .....	57
Les propriétés du signal sinusoïdal .....	59
Résistance et résistor .....	61
Débutons simplement... .....	61
La résistance .....	61
Le résistor .....	63
La pratique .....	65
Utiliser un résistor .....	65
Exercices .....	67

Les associations .....	69
Montage série .....	69
Montage en dérivation .....	70
Pont diviseur de tension .....	72
Les résistors variables .....	75
Le potentiomètre .....	75
Les autres résistors variables .....	82
Code couleur .....	83
<b>Le condensateur en régime continu .....</b>	<b>88</b>
Introduction et principes .....	88
Commençons par les principes .....	89
Charge d'un condensateur .....	89
Décharge d'un condensateur .....	91
Capacité d'un condensateur .....	91
Notion de temps .....	92
Charge et décharge d'un condensateur à travers un résistor .....	92
Calcul de la charge accumulée .....	96
Les associations .....	97
Association parallèle .....	97
Association série .....	98
Exercice .....	99
Technologies .....	100
Plus de propriétés ! .....	100
Les condensateurs non polarisés .....	102
Condensateurs à électrolytes chimiques (polarisés) .....	103
Les condensateurs variables .....	105
<b>La bobine .....</b>	<b>106</b>
Généralités .....	106
Qu'est ce qu'une bobine ? .....	106
A quoi ça ressemble ? .....	106
Symbole .....	107
Où est-ce qu'on en trouve ? .....	107
Influence d'une bobine dans un circuit .....	107
Propriétés d'une bobine .....	109
L'inductance .....	109
La bobine réelle .....	112
Les associations de bobines .....	113
La bobine en régime continu .....	114
Le soft-start .....	114
Les relais .....	114
La bobine en régime variable .....	115
L'impédance d'une bobine .....	115
Retard de phase .....	116
Comportement fréquentiel .....	117
Pour aller plus loin .....	117
Le phénomène d'induction .....	117
Exemples d'applications du phénomène d'induction .....	119
<b>Partie 3 : [Théorie] L'amplificateur opérationnel ou AOP .....</b>	<b>121</b>
<b>L'amplification d'un signal .....</b>	<b>122</b>
Rappels sur les signaux .....	122
Notions sur l'amplification .....	123
Principe de l'amplification .....	123
Les types d'amplifications .....	124
L'amplification par l'exemple .....	125
Généralités sur les amplificateurs .....	126
Un amplificateur, c'est quoi ? .....	126
Fonctionnement d'un amplificateur quelconque .....	128
Caractéristiques universelles .....	129
<b>Partie 4 : [Théorie] Les composants à base de semi-conducteur .....</b>	<b>133</b>
<b>Introduction aux semi-conducteurs .....</b>	<b>134</b>
Un semi... quoi ? .....	134
Un tout petit peu de physique quantique .....	134
Isolant, conducteur, semiconducteur .....	135
Les éléments semi-conducteurs .....	136
Les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques .....	138
Semi-conducteurs intrinsèques .....	138
Le dopage chez les semi-conducteurs extrinsèques .....	139
Propriétés des dopants .....	139
Les différents dopages .....	140
La jonction PN .....	141
Que se passe-t-il à une jonction PN ? .....	141
Polarisation d'une jonction et application .....	142
<b>La diode .....</b>	<b>145</b>
La diode .....	145
Avant de commencer .....	145
Symbole .....	145
Polarité .....	146
Régime continu .....	146
Utilisation .....	146
Caractéristiques .....	147
Régime variable .....	149

Suppression d'alternance .....	149
La diode Zener .....	152
Fonctionnement .....	153
Équivalence .....	156
Diversité des diodes .....	157
Cas d'utilisation de la diode .....	157
Autres diodes .....	159
<b>Le transistor en régime de saturation .....</b>	<b>159</b>
Présentation .....	160
Le transistor .....	160
Le transistor bipolaire .....	161
Régime de saturation .....	163
Fonctionnement en régime de saturation .....	163
Utilité du montage .....	166
Conclusion .....	167
Le transistor PNP .....	168



# L'électronique de zéro



Par

olyte et



Basil1402 et



uknow et Polinichon

Mise à jour : 02/12/2012

Difficulté : Intermédiaire



Durée d'étude : 2 mois



Bonjour à toutes et à tous ! 😊

Si vous êtes ici, même s'il s'agit d'un hasard, c'est qu'il y a une très grande probabilité que vous ayez envie de vous documenter ou d'apprendre l'électronique.

Quels sont les principes de base ? Comment connaître les composants et pouvoir les utiliser pour faire des montages ? Comment faire ses propres montages ? Telles sont les questions auxquelles nous vous amèneront des réponses afin de satisfaire vos besoins sur le sujet.

Nous commencerons le cours "en douceur" par les formules et les lois nécessaires et fondamentales à connaître en électronique. Ce sera peut-être un peu long au début, mais dès que vous aurez assez de maniabilité avec ces lois et formules, vous pourrez ensuite vous divertir par l'apprentissage de l'utilisation des composants fondamentaux de l'électronique. Nous vous proposerons aussi quelques exercices qui vous permettront de mettre en application ce que vous aurez appris au fil de votre lecture. Puis viendra le moment où vous serez fin prêt à pénétrer plus en profondeur dans le milieu de l'électronique en apprenant à utiliser des composants très polyvalents tels les Amplificateurs OPérationnels (AOP) et qui permettent, non pas de faire des miracles, mais de rendre vos montages électronique intelligent, dans le sens où ils seront en mesure de traiter des signaux dans le but de réagir à un "événement" donné. Ensuite, nous continuerons à voyager vers des domaines très utilisés de l'électronique (filtres, semi-conducteurs) qui vous permettront d'améliorer vos montages. Pour terminer, nous nous attaquerons à un domaine spécifique très intéressant que sont les infrarouges.

Enfin, pour ne pas nous quitter sur de long chapitres plein de théorie, mais aussi d'éléments pratiques, nous terminerons le cours par une bonne dose de pratique essentielle à l'électronicien. Nous aborderons l'outillage et les appareils de mesures nécessaire à la fabrication et au dépannage de cartes électronique, puis nous enchaînerons sur des exemples d'utilisations de composants de bases afin de vous montrer leur fonctionnement réel et les pièges à éviter lors de tests de mise en œuvre.

Sachez toutefois que le domaine de l'électronique est tellement vaste que nous ne pouvons pas vous présenter toutes les facettes de cette science. Nous allons cependant vous expliquer l'essentiel afin que vous puissiez rapidement réaliser vos propres montages.



**Le but de ce tutoriel n'est pas de vous former pour un métier, mais de vous enseigner l'utilisation de l'électronique. Il ne remplace pas les cours traités par les enseignants en milieu scolaire et n'a pas pour but de suivre un programme scolaire en particulier. Il est écrit pour tout le monde.**

**Nous ne ferons à aucun moment de l'électronique programmée dans ce tutoriel. Si cela vous intéresse vraiment, vous pouvez aller lire cet autre tutoriel.**

Avis donc à tous les amateurs, les hobbyistes, les professionnels et les étudiants : vous venez de dénicher la perle rare ! 😊



**Avant de poursuivre, sachez qu'il y a quelques prérequis : il faut avoir un minimum de connaissances mathématiques et savoir ce que sont des équations et lire des graphiques. Pas plus, ni moins.**

## Partie 1 : [Théorie] Bases et notions élémentaires

Il est, avant toutes choses, primordial de commencer par apprendre les bases de l'électricité et ne pas se lancer, tête baissée, à l'assaut des composants sans avoir acquis ces bases. Je l'admet, ce sera un peu rébarbatif, mais tout électronicien qui se vaut est passé par là ! Alors ouvrez grand vos yeux, vous allez faire vos premiers pas en électronique... Bon voyage ! 😊

### 📄 Présentation et mise en garde

Le monde merveilleux de l'électronique nous ouvrira ses portes seulement lorsque l'on sera prêt à comprendre les phénomènes physiques que l'on va manipuler ainsi que les risques encourus. Pour cela, nous allons commencer par faire une rapide explication de ce qu'est l'électronique et de ses domaines de prédilection. Nous poursuivrons par une explication non exhaustive des phénomènes physiques qui constituent l'électronique. Enfin, ce n'est qu'à ce moment-là que nous pourrons nous diriger vers une partie plus intéressante : l'apprentissage du fonctionnement et de l'utilisation des composants électroniques de base.

#### Présentation

Pendant ces deux derniers siècles, après de nombreuses découvertes scientifiques sur l'électricité et sur son application, l'électronique est apparue. Bien des composants ont été inventés au tout début, mais leur application avait une étendue limitée notamment à cause de la place qu'ils occupaient et de l'impossibilité d'être exploités et fabriqués en grande quantité. Plus les années avançaient, plus l'électronique se miniaturisait et se fiabilisait.

#### *Pourquoi l'électronique a-t-elle été inventée ?*

Avec les guerres, l'électronique fut un domaine favorisé car très utilisé dans la fabrication d'engins de combat et de matériel militaire, mais aussi la communication par radio. Aujourd'hui, elle vient s'imposer dans nos foyers en améliorant notre confort quotidien. La physique, la médecine et l'électronique elle-même sont favorisées par les applications possibles de l'électronique grâce au matériel de plus en plus sophistiqué et performant. Son seul but est donc d'améliorer le confort et de permettre la recherche scientifique de façon plus aisée.

#### *Qu'est-ce que l'électronique ?*

Avant de nous lancer dans l'apprentissage de l'électronique, il est bon de savoir ce que c'est exactement. Je vais reprendre en partie la définition que nous offre *Wikipedia* pour vous l'expliquer. 🤖

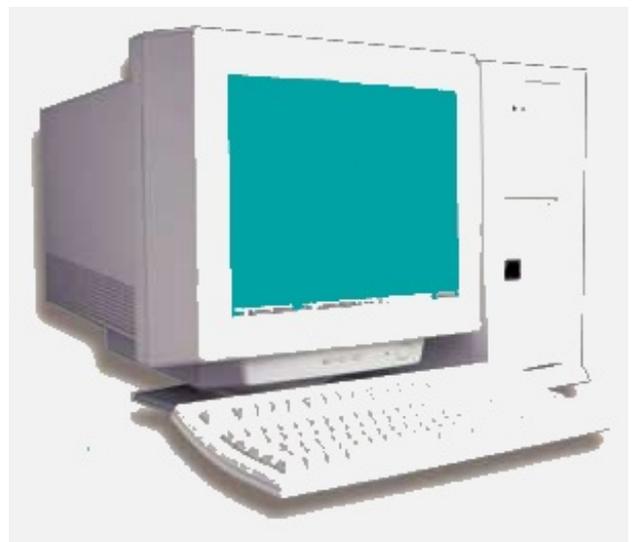
L'électronique est une science qui permet l'étude de structures qui traitent des signaux électriques, le but étant de transmettre ou de recevoir des données ou de l'énergie afin de créer des systèmes plus ou moins complexes et autonomes. Ces systèmes utilisent des sources d'énergie pour pouvoir fonctionner. En général, il est question d'association de sous-systèmes pour en créer de gros qui présentent la caractéristique de réaliser plusieurs tâches différentes et parfois en même temps.

On peut trouver deux branches en électronique : l'électronique de signaux et l'électronique de puissance. Nous parlerons uniquement de l'électronique qui utilise des signaux car l'électronique de puissance se révèle plus dangereuse à manipuler (mais fera l'objet d'un cours à part entière).

#### *Étendue de l'électronique*

Cela peut paraître évident pour certains, mais moins pour d'autres : l'électronique est présente partout dans notre quotidien, que ce soit dans les pays riches et développés où elle améliore le confort et la recherche ou dans les pays pauvres qui recyclent les objets électroniques afin de subvenir à leurs besoins, par exemple.

Prenons quelques exemples d'appareils électroniques. Le premier qui nous viendrait à l'esprit est celui que vous utilisez en ce moment même, en lisant ce cours : le *smartphone* ou l'ordinateur. Tous deux fonctionnent avec de l'électronique. Un exemple plus anodin : la montre que vous portez au bras fonctionne grâce à un circuit électronique.



#### Pourquoi choisir d'apprendre

## L'électronique ?

Voilà une question assez vaste tout de même ! Pourquoi diable se lancer dans l'apprentissage de l'électronique ?

Plusieurs raisons sont valables. Afin de vous en convaincre, nous expliquerons par la suite pourquoi c'est un bon choix. Attention cependant, nous ne vous incitons pas à apprendre l'électronique, nous vous présentons simplement les aspects bénéfiques que nous apporte cette science.

### *Avenir de l'électronique*

Je n'aurais certainement pas créé ce tutoriel s'il n'y avait pas eu d'avenir certain pour l'électronique. Pour vous donner quelques exemples résultant de cette science, voici un petit résumé des avancées technologiques permises par l'électronique.

Ces dernières décennies, l'électronique a marqué le domaine de la physique et des recherches scientifiques grâce à ses innovations technologiques telles que le microscope électronique et à effet tunnel, les accélérateurs de particules, l'ordinateur et la plus importante (surtout l'une des premières) : la calculatrice ! Toutes ces avancées ont permis des évolutions incroyables dans bien d'autres domaines comme la médecine, la chirurgie, le domaine militaire, les constructions mécaniques (voitures, machines-outils...) et du bâtiment, etc.

L'électronique, après de nombreux services rendus, n'a pas cessé d'exister et nous étonne même encore. Dans un futur proche, il se pourrait bien que l'on se retrouve dans un monde proche du décor du film *Avatar* de James Cameron (en matière de technologie). Les téléphones portables seront flexibles et transparents, ainsi que les écrans. Tout sera miniaturisé à tel point que l'espionnage sera devenu banal dans la vie de tous les jours car rendu extrêmement facile.

Plus intéressant maintenant : les jeux vidéo ! 🤖 Ce ne seront plus les mêmes qu'actuellement, ils imiteront la réalité avec perfection ; si bien que l'on risquera de se croire vivant dans un monde virtuel ! Mais pour en arriver là, il faut des personnes compétentes en informatique, certes, mais surtout en électronique pour concevoir le « cocon » qui plongera le joueur dans le monde virtuel.

### *Utilité de l'électronique*

À quoi cela va vous servir d'apprendre l'électronique ? Eh bien, il y a plusieurs réponses possibles, ceci selon vos goûts. En effet, devenir technicien en électronique peut être l'envie ou le rêve de certains (autrement dit : faire de l'électronique son métier). D'autres préféreront tout simplement savoir se servir de l'électronique afin de réaliser leurs propres montages ayant une utilité pour leurs propres besoins ou ceux des autres. En outre, ces deux possibilités se recoupent puisqu'elles ont un objectif en commun : concevoir l'électronique de demain !

Dans les deux cas, vous êtes bien tombé en venant lire ce tutoriel sur l'électronique ! Il vous permettra de vous préparer pour entrer dans une section électronique de l'enseignement ou bien de vous permettre de créer des montages simples. Parmi eux : sirène, clignotant lumineux, détecteur d'inondation, alimentation, amplificateur audio...

### *Métiers de l'électronique*

Je ne vais pas vous faire une fiche détaillée de chaque métier que compte l'électronique dans ses effectifs, cela serait bien trop long et fastidieux, mais je vais vous montrer les débouchés possibles avec un bon niveau en électronique et aussi la place qu'il y a dans ce domaine.

Premièrement, si l'on veut trouver un bon emploi dans une entreprise qui tourne sans difficulté, il faut malheureusement faire des études et passer des diplômes qui sont reconnus nationalement et/ou internationalement. Pour plus de renseignements sur ces formations pré-bac ou post-bac, il suffit de rechercher sur Internet en allant par exemple sur le site de l'Onisep.

Voici une liste non exhaustive des métiers que l'on peut trouver dans le domaine de l'électronique (liste que j'ai honteusement pompée sur Internet 🤖).

#### **Citation : Onisep.fr**

##### **La recherche amont :**

- ingénieur d'études avancées ;
- ingénieur d'études avancées doctorant.

##### **L'élaboration de la proposition :**

- architecte système logiciel ;

- architecte système matériel.

#### Le développement :

- ingénieur études et développement en électronique analogique ;
- ingénieur études et développement en logiciels de simulation ;
- ingénieur études en mécanique et thermique (dans le domaine spatial) ;
- ingénieur études et développement en optique ;
- ingénieur études et développement en logiciels.

#### La production, les tests et l'intégration :

- technicien méthodes ;
- responsable industrialisation ;
- technicien d'essai et d'intégration.

#### Les services et le support :

- responsable de soutien logistique intégré ;
- technicien de services et supports opérationnels.

#### D'autres métiers :

- ingénieur de programme ;
- acheteur industriel ;
- ingénieur commercial ;
- ingénieur assurance qualité.

On peut dire que vous avez du choix ! 😊

### Risques de l'électricité sur le corps humain

Si manipuler quelque chose que l'on ne voit pas est difficile, manipuler quelque chose de mortel que l'on ne voit pas non plus est dangereux. Cette chose, c'est l'électricité.

Plus jeune, on vous a certainement dit qu'il ne fallait pas mettre les doigts dans une prise ; sachez que lorsque l'on manipule l'électricité, certaines règles s'ajoutent !

Il y a certains points dangereux qu'il ne faut absolument pas négliger sous peine de commettre des erreurs irréversibles dans les cas les plus graves. L'électronique n'est pas sans danger, retenez-le !



**Je le répète donc, l'électronique est une science assez dangereuse à mettre en œuvre si l'on ne prête pas attention aux moyens qui permettent d'éviter tout risque !**



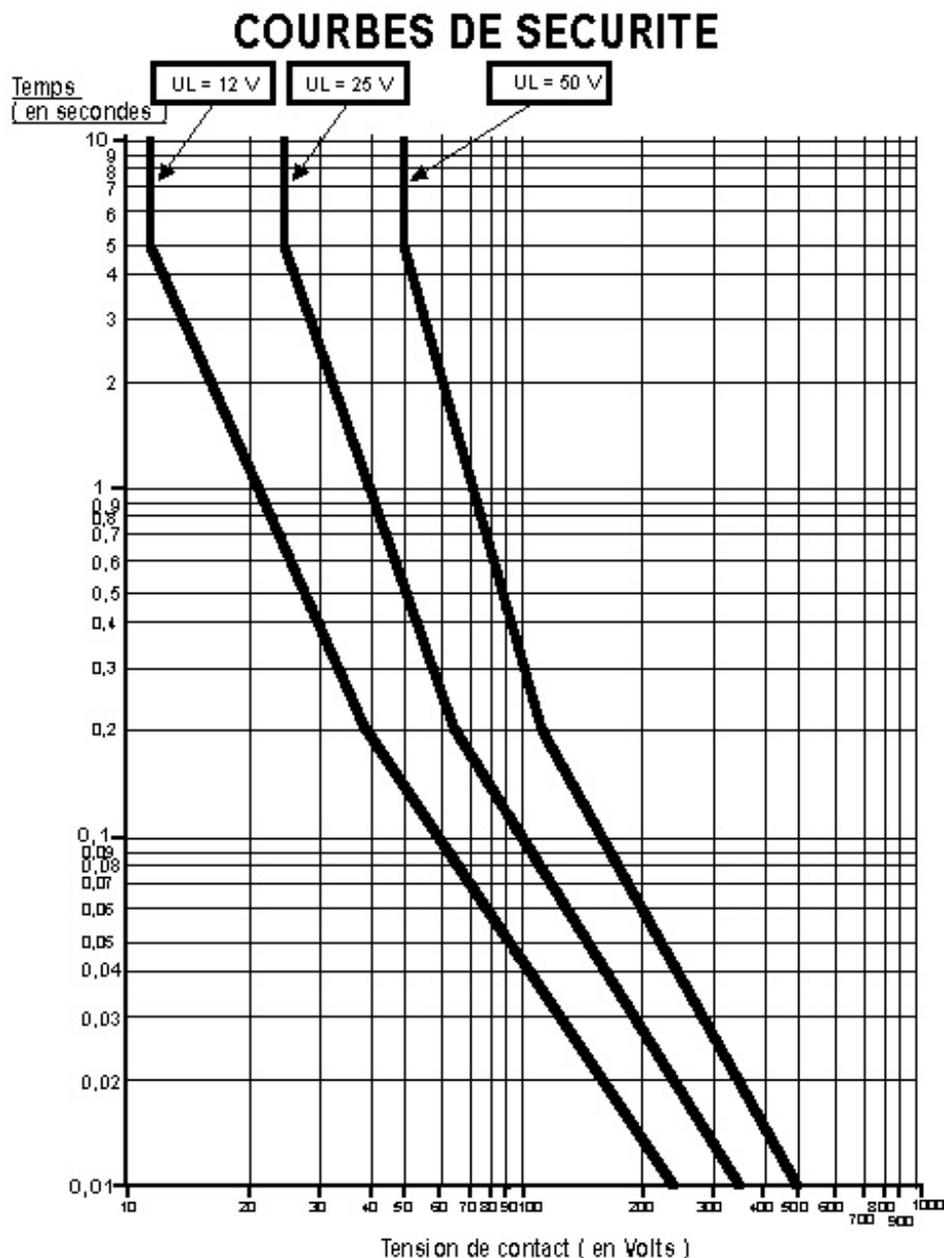
Nous parlerons des grandeurs électriques dans le prochain chapitre. Mais avant cela, nous allons présenter les risques de l'électricité sur le corps humain. Revenez donc lire ce qui suit (si cela vous intéresse) après avoir lu le chapitre suivant.

Si l'électricité est dangereuse, c'est parce que le corps humain est sensible au courant électrique d'autant plus que nous ne disposons d'aucun sens qui nous permette de ressentir le passage du courant à travers notre corps. L'électrocution représente environ deux cents décès par an en France.

### Les effets du courant électrique sur le corps humain

Le corps humain se comporte comme une résistance dont la valeur est variable selon les individus, plus ou moins résistants, et en fonction de leur peau : si cette dernière est sèche, la résistance sera élevée, si au contraire elle est humide, la résistance sera

faible. Partant de ce principe, la norme NF C 15-100 permet d'établir des courbes de sécurité :



Ces courbes délimitent dans le repère  $t=f(U_c)$  la durée maximum d'exposition sans danger mortel en fonction de la tension de contact  $U_c$  et du type de local :

- $U_L = 12 \text{ V}$  : local immergé (piscine, sauna, milieu extérieur...);
- $U_L = 25 \text{ V}$  : local avec point d'eau (cuisine, salle de bain...);
- $U_L = 50 \text{ V}$  : local sec (bureau et toutes les autres pièces d'une habitation).

À titre informatif, ce tableau vous permettra d'appréhender les niveaux de risque du courant sur le corps humain :

Effets	Courant continu	Courant alternatif
Légère sensation de picotement	0,6 - 1,0 mA	0,3 - 0,4 mA
Sensation évidente	3,5 - 5,2 mA	0,7 - 1,1 mA
Douleurs, mais contrôle musculaire conservé	41 - 62 mA	6 - 9 mA
Douleurs et incapacité de lâcher le métal	51 - 76 mA	10 - 16 mA

Difficultés respiratoires (paralysie de la cage thoracique)	60 - 90 mA	15 - 23 mA
Fibrillations cardiaques (dans les 3 secondes)	500 mA	65 - 100 mA

En électronique, on utilisera uniquement l'électricité dans le domaine de la très basse tension (abrégée TBT). C'est le domaine où la tension minimale est de 0 volt et la tension maximale est de 24 volts.

*A priori*, la tension ne posera pas de problème, mais faites très attention au courant !

### Comment s'en protéger ?

Bien entendu, pour éviter tout accident, vous devez respecter quelques règles toutes simples.

#### L'espace de travail

Il faut :

- un poste de travail dégagé, solide, plat et si possible avec une table et un siège confortable 😊 ;
- un éclairage suffisant ;
- des espaces de rangement pour ranger les outils et composants nécessaires.

#### La sécurité

- Utilisez une source de courant indépendante : préférez une alimentation stabilisée (avec isolation galvanique par transformateur) ou des piles plutôt qu'un branchement direct sur le réseau EDF.
- Faites toutes les vérifications possibles avant la mise sous tension : vérifiez que votre circuit électronique ne possède pas de court(s)-circuit(s) et que la source d'alimentation est adaptée au circuit.
- Éloignez tout liquide, animal et jeune enfant. Vous devez être seul sur votre espace de travail.
- Travaillez en bonne forme (aucun travail lorsque vous êtes fatigué, distrait ou éventuellement malade).
- Toute manipulation d'un circuit ou d'un appareil électronique doit se faire **HORS TENSION !**



Au risque de me répéter, l'électronique n'est pas sans danger ! Toutes ces règles sont importantes et doivent être respectées, sans quoi vous engagez votre responsabilité et surtout votre vie et celle des autres dans le pire des cas !

J'espère ne pas vous avoir fait peur en vous donnant toutes ces précautions ! 😊

### Responsabilité : qui ?

En tout cas, j'ai bien insisté sur les points incontournables ! Mais ce que je ne pas encore évoqué, c'est la responsabilité engagée lors de vos actions. Développons.

## VOUS ÊTES LE SEUL RESPONSABLE DE VOS MANIPULATIONS !

Sur ce point, le développement est infaillible. 😊

#### Pourquoi êtes-vous le seul responsable ?

Eh bien, cette conclusion provient de ce qui a été dit précédemment. Vous devez être seul sur votre espace de travail ! Si tel n'est pas le cas, vous serez responsable de chaque acte réalisé par la personne qui vous entoure (même si c'est le chat du voisin) et des dégâts qui peuvent en découler sur votre projet. Si par chance, aucun incident ne s'est produit quand votre petite sœur est venue vous voir pour regarder de plus près le travail que vous effectuiez, il se peut que vous soyez perdu après cette déconcentration au risque de faire une erreur qui puisse mettre à mal votre projet.

#### Et si mes erreurs étaient dues à une mauvaise explication dans ce tutoriel ?

Dans ce cas, si vous trouvez un problème dans une explication ou un schéma, **prévenez-nous** afin que nous puissions corriger

nos erreurs et par là même éviter à d'autres zéros de faire cette erreur. Cependant, il ne tient qu'à vous de vérifier, par vos connaissances, que ce que vous vous apprêtez à faire est exempt de toute erreur ! Cependant, nous ferons tout notre possible pour éviter ce genre de désagrément, soyez rassuré. Le risque zéro n'est jamais atteint...

*Ce qu'il faut retenir à tout prix !*

**L'électronique est dangereuse**, surtout lorsqu'on ne prend pas de précautions ! **Le responsable, c'est vous et personne d'autre !**



**Par là même, je rajoute que les rédacteurs de ce tutoriel seront mis hors de cause lors d'accidents mineurs ou majeurs et qu'aucune responsabilité ne pourra être retenue contre ces derniers !**

Vous pouvez lire la suite de ce tutoriel en toute sérénité ! 😊

## L'électricité

S'il y a bien quelque chose d'indispensable en électronique, c'est la maîtrise des grandeurs électriques et de leur origine. C'est pourquoi ce chapitre est là pour vous expliquer les notions essentielles à savoir sur ces grandeurs.

En électronique, on manipule diverses grandeurs physiques. Une grandeur physique est un « truc » (pardonnez la vulgarisation) qui se mesure. On va essentiellement utiliser trois grandeurs physiques qui sont : la *tension*, le *courant* et la *puissance*.

Pour comprendre quelles sont les origines de ces grandeurs, on fait souvent une analogie avec les fluides (par exemple de l'eau). Je ne vais donc pas déroger à la règle, c'est ce que je vais faire mais en prenant un exemple plus concret. 😊

### Analogie



L'explication suivante fait appel à une **analogie**. Une analogie est le fait de rapprocher deux phénomènes semblables afin de faciliter la compréhension d'un phénomène par celle d'un autre plus facile à assimiler.

Entrons dans le contexte par cette analogie toute simple : soit un engin qui fonctionne avec du carburant. J'ai représenté son fonctionnement interne ultra simplifié par cette image :

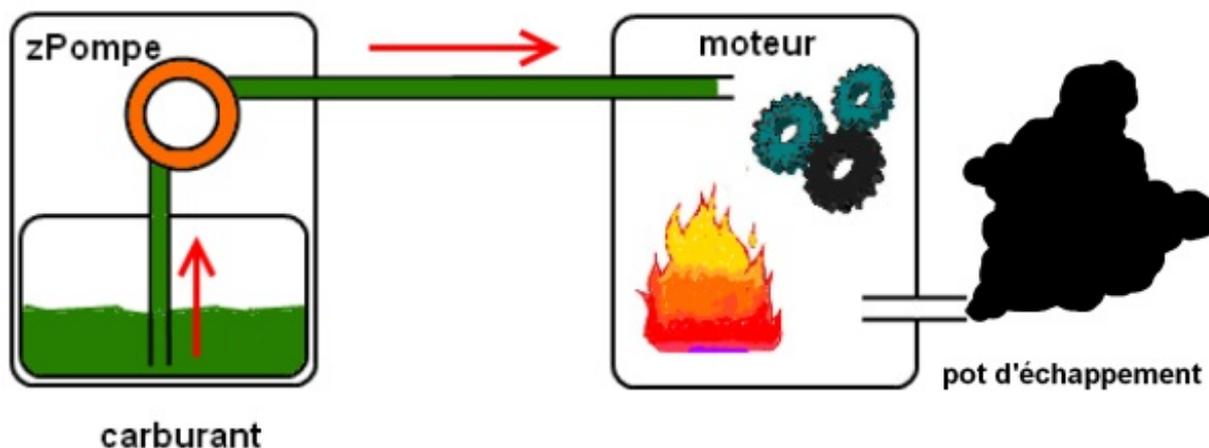


Figure 1 – Fonctionnement interne de l'engin

L'engin est composé d'une *pompe* (originellement appelée *zPompe* 😊) ainsi que d'un *réservoir* qui contient du *carburant*. Cet ensemble se trouve dans le cadre gauche de l'image. Un autre cadre (à droite) contient un *moteur* (dont le fonctionnement interne n'est représenté que schématiquement par du feu et des engrenages) et un *pot d'échappement*.



Gardez bien cela en tête, car c'est là-dessus que nous travaillerons.

### La source d'énergie

Nous allons d'abord déterminer d'où viennent les grandeurs physiques avant de voir ce que c'est exactement. L'analogie précédente n'étant pas là pour de la figuration, c'est avec elle que nous travaillerons.

### Le générateur

Un **générateur** est un système qui fournit de l'énergie. Dans notre engin, le générateur est l'ensemble constitué par le carburant et la pompe.

En effet, si l'on regarde le fonctionnement de ce générateur, la *zPompe* va « aspirer » le carburant contenu dans le réservoir et va le livrer au moteur. Il y a donc génération d'un mouvement de carburant qui va se diriger vers le moteur, moteur qui à son tour va s'en servir pour faire fonctionner l'engin.

### En électricité

En électricité, on ne dispose pas de carburant ni de pompe mais de *sources* qui génèrent des grandeurs physiques, les mêmes que nous allons aborder dans ce chapitre.

Citons plusieurs de ces sources que vous connaissez certainement déjà :

- la pile ;
- la batterie ;
- l'accumulateur ;
- le secteur électrique (attention, ce n'est pas le même type de source que les autres).

## Le récepteur

Un **récepteur** est un système qui reçoit de l'énergie. Toujours dans notre engin, le récepteur est le moteur.

Là encore, si l'on étudie le fonctionnement, le moteur reçoit le carburant provenant du générateur pour ensuite l'utiliser afin de fonctionner.

### En électricité

En électricité, on dispose aussi de moteurs mais on les appelle « récepteurs ». Ils n'absorbent pas de carburant, mais ils utilisent les grandeurs physiques de l'électricité (toujours les mêmes dont nous allons parler au cours de ce chapitre).

Citons plusieurs exemples que vous connaissez également :

- le chauffage ;
- le grille-pain ;
- le téléphone portable ;
- l'ordinateur ;
- etc.

Pour faire simple, un récepteur en électronique est tout ce qui fonctionne avec de l'électricité.

## L'essentiel

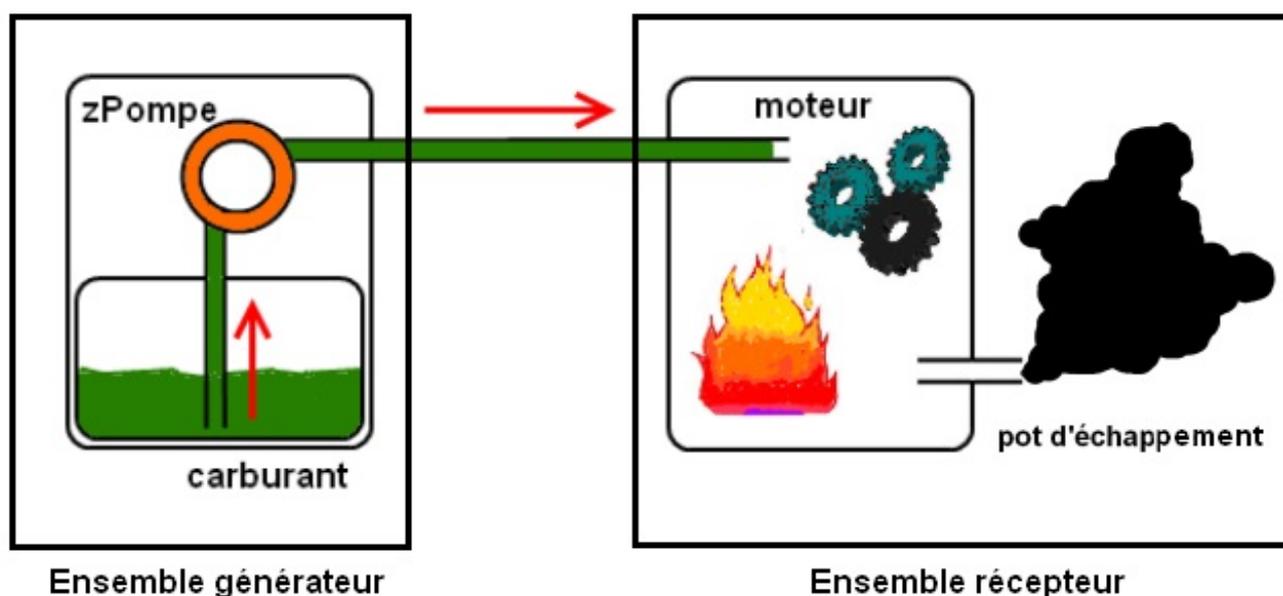


Figure 2 – Découpage en deux parties du fonctionnement de l'engin

Ce qu'il faut retenir, c'est que le générateur fournit le carburant nécessaire au fonctionnement du récepteur qui absorbe ce

carburant pour fonctionner.

En électronique, on travaille sur la conception, la réalisation et l'analyse du fonctionnement interne du récepteur, qui n'est autre que le circuit électrique. Le générateur n'est étudié que lorsque l'on a besoin de le créer pour répondre à son propre besoin. En attendant, concentrons-nous sur la partie « récepteur ».

## Le courant



Notez que je vais vous montrer ce qu'est le courant en utilisant un générateur que vous connaissez bien : la pile. Cependant, ce sera le seul chapitre qui utilisera cet élément comme source d'énergie. Après, il sera question d'utiliser des générateurs dit "idéaux".

Dès que l'on met en marche notre engin (imaginons que c'est une voiture), la zPompe va fonctionner et va envoyer le carburant vers le moteur. En faisant circuler le carburant à travers le tuyau, elle crée ce que l'on appelle un **courant** (représenté par la flèche en rouge). En terme technique, on dit qu'elle *débite un courant*.

Ce courant, c'est simplement un déplacement de carburant. Plus la quantité de carburant déplacé est grande et plus le carburant se déplacera vite, plus le courant sera intense.

Ce qui va donc être déplacé par la zPompe, c'est du carburant.



Mais dans le cas d'un circuit électronique qui fonctionne non pas avec du carburant mais avec de l'électricité, qu'est-ce qui va se déplacer ?

Ce sont des charges électriques.

Charges électriques ? 🤔 Ça mérite une petite explication.

## Les charges électriques

Pour définir correctement le courant électrique, il faut d'abord savoir ce qu'est une **charge électrique**.

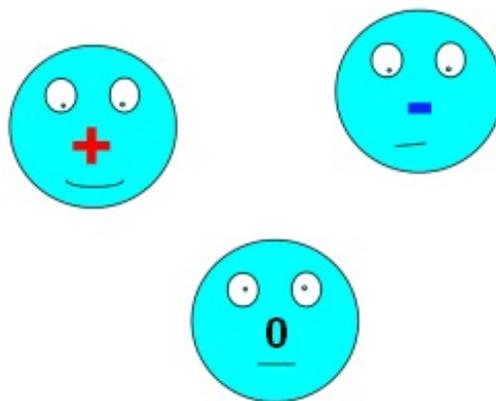
### Citation : Wikipédia

Comme la masse, la charge électrique est une propriété intrinsèque de la matière, qui permet d'expliquer l'origine de certains phénomènes. Personne n'a jamais observé directement une charge électrique, mais les scientifiques ont remarqué des similitudes de comportement de certaines particules : ils ont donc postulé que ces particules avaient des caractéristiques en commun, dont les propriétés coïncidaient avec leurs observations.

En résumé, la charge électrique est une grandeur physique qu'on peut donner à un objet et qui peut être mesurée par un nombre.

Ce nombre peut :

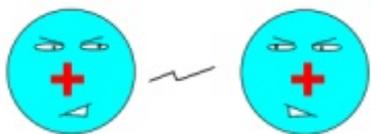
- être supérieur à 0 : on dit alors que la charge de l'objet est **positive** (bonhomme avec le +) ;
- être inférieur à 0 : on dit alors que la charge de l'objet est **négative** (bonhomme avec le -) ;
- être égal à 0 : on dit alors que la charge de l'objet est **nulle** (bonhomme avec le 0).



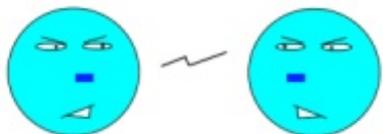
Cette charge va influencer la façon dont les objets autour vont se déplacer. Un objet qui possède une charge électrique va agir sur tout objet possédant lui aussi une charge électrique et va l'attirer ou le repousser. Par exemple, l'électricité statique est due à ces charges électriques.

La façon dont les charges réagissent entre elles est assez simple à décrire. Avec mon talentueux génie et mon adorable Paint.NET, je vous ai concocté une suite d'images pour lesquelles vous allez vous régaler ! 🤖

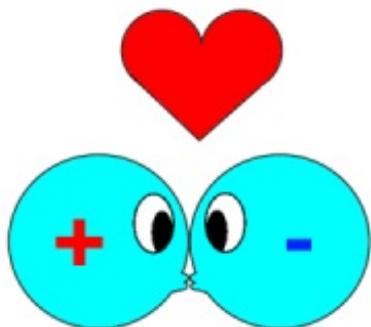
- Deux charges positives vont se repousser.



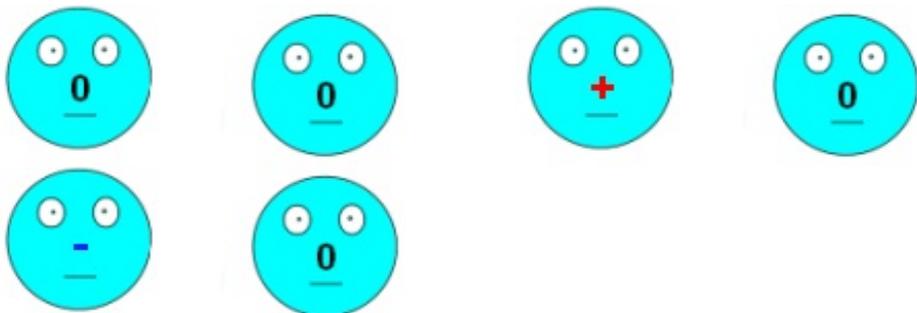
- Deux charges négatives vont se repousser.



- Une charge positive va attirer une charge négative et inversement.



- Les charges nulles ne sont pas du tout attirées ni repoussées. Et inversement, elles n'attirent ni ne repoussent les autres charges. En clair, elles ne font rien. On peut donc les laisser de côté et ne plus s'en soucier.



Ainsi, une charge va avoir tendance à dévier ou accélérer toute particule qui passe à proximité. La zone dans laquelle une charge électrique va agir sur les autres charges de passage s'appelle un champ électrique.

Maintenant, on sait ce qui se déplace dans un circuit. Avec la zPompe, c'était du carburant, en électronique, ce sont nos charges électriques. On peut maintenant définir correctement ce qu'est un courant :

**Un courant électrique est un déplacement ordonné de charges électriques.**

Vous remarquerez que j'ai utilisé le mot ordonné dans ma définition du dessus. Cela signifie une chose : des charges qui se déplacent n'importe comment ne forment pas un courant. Pour mériter le nom de courant, il faut que toutes les charges se déplacent dans le même sens et dans la même direction.

Dès qu'il y a une ou plusieurs charges électriques qui se déplacent dans le même sens et la même direction, il y a création d'un **courant électrique**.

## La notion de conductibilité

Tous les matériaux ne se comportent pas de la même façon en présence d'un courant électrique. Leur comportement diffère en fonction d'un paramètre que l'on appelle la **conductibilité** :

**La conductibilité, c'est la capacité qu'ont les matériaux à se faire traverser par un courant électrique.**

La conductibilité va définir ce qui se passe quand on envoie un courant dans un matériau : est-ce que les charges électriques vont pouvoir traverser le matériau facilement ou pas ?

Du point de vue de la conductibilité, il existe quatre grandes familles de matériaux :

Famille de matériaux	Propriétés
Les isolants	<u>Conductibilité nulle.</u> Le <b>courant ne passe pas</b> à travers ces matériaux. Citons par exemple le plastique ou le verre.
Les semi-conducteurs	<u>Conductibilité faible, mais variable suivant la situation.</u> Ils <b>ne se laissent pas traverser facilement par un courant</b> , sauf dans certaines situations. Là encore, tout dépend de certains paramètres. Par exemple, certains sont complètement isolants, mais laissent passer le courant quand on les éclaire ou quand on les chauffe. Citons quelques exemples : le silicium ou le germanium.
Les conducteurs métalliques	<u>Conductibilité forte.</u> Ils <b>se laissent traverser par le courant</b> quelles que soient les circonstances. Le seul problème est qu'une partie de l'énergie des charges électriques du courant va se dissiper dans le métal sous forme de chaleur. Citons le cuivre, l'aluminium, l'or, le fer... Tous les métaux en somme.
Les supraconducteurs	<u>Conductibilité infinie.</u> Ils <b>se laissent traverser par un courant</b> sans opposer la moindre résistance. Un courant qui rentre dans le matériau ressortira sans aucune perte : pas de création de chaleur. Enfin, ce n'est vrai qu'en théorie : dans la réalité, un supraconducteur possède toujours quelques impuretés qui seront la cause de pertes, aussi infimes soient-elles, par effet Joule (chaleur).

Dans les circuits électroniques, on utilise aussi bien des semi-conducteurs que des conducteurs métalliques. Sur un montage électronique, on utilise aussi des isolants.



Pourquoi n'a-t-on pas de supraconducteurs ?

Eh bien parce que les supraconducteurs sont vraiment très chers et qu'un matériau n'est supraconducteur qu'à de très basses températures proches du zéro absolu (non, pas Zozor ! 🤪) qui vaut **0K** (zéro Kelvin). En Celsius, cela donne **-273,15°C**. Ils ne sont donc utilisés que dans des conditions extrêmes (c'est le cas de le dire), souvent pour la recherche scientifique.

## Sens du courant

Tout d'abord, un courant n'apparaît pas comme ça, il faut fatalement quelque chose qui va influencer les charges électriques de façon à les déplacer. Ce quelque chose, on l'appelle un *générateur électrique*. Son rôle : créer un courant dans un circuit.

Dans notre analogie, c'est la pompe qui va pomper le carburant et qui va l'envoyer dans le circuit. Un générateur électrique agit de la même façon, mais avec des charges électriques. Bon, ce n'est pas exactement ça, mais si on a le temps, on verra comment fonctionne un générateur électrique (il ne contient pas de pompe à l'intérieur).

Dans l'exemple qui va suivre, notre générateur sera une *pile électrique* qui possède deux bornes : une positive (« + ») et une négative (« - »). Ces bornes sont un simple morceau de conducteur sur lequel il y a un léger déséquilibre de charges :

- la borne « + » contient des charges positives en excès (en réalité, elle manque de charges négatives, mais quoi qu'il en soit, cette borne aura une charge positive) ;
- la borne « - » contient un excès de charges négatives.

Prenez un exemple avec ce schéma simplissime :



Attention, le fait de relier les deux bornes d'une pile (ou d'un générateur en général) par un fil va créer ce que l'on appelle un **court-circuit**. Il en résulte une décharge ultra rapide de la pile et un échauffement de cette dernière et du fil. Donc, en pratique, **on ne le fera jamais** (à une exception près pour le transformateur, nous aurons certainement l'occasion de le revoir).

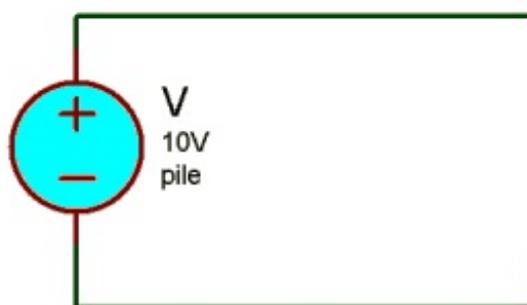


Figure 3 – Pile dont les bornes sont reliées par un fil

Si l'on relie ces deux bornes par un fil conducteur, les charges d'une des deux bornes vont s'attirer fortement et vont se déplacer dans le fil pour aller rejoindre l'autre borne.



Mais dans quel sens ? De quelle borne vers quelle borne ?

Eh bien... ça dépend. Ça dépend du matériau utilisé pour fabriquer le fil.

### *Sens conventionnel du courant*

Afin d'éviter toute complication, les scientifiques du monde entier se sont réunis il y a longtemps et ont défini des lois (ou plutôt des conventions) qu'il faut respecter, le but étant d'éviter toute confusion entre scientifiques, amateurs, techniciens... et d'imposer un système bien cadré. Je vais vous donner l'une d'entre elles à propos du courant.

Le sens conventionnel du courant est celui que l'on donne au sens de circulation du courant. C'est-à-dire que quel que soit son sens (qu'il parte du pôle « + » de la pile pour aller au pôle « - », ou inversement), par convention, il ne sera fléché et défini que dans un sens unique. Cette convention impose que le courant en provenance d'un générateur (la pile dans notre exemple) sorte obligatoirement de la borne positive de ce dernier, pour aller rejoindre sa borne négative.



En réalité, plusieurs études scientifiques ont démontré que le sens du courant était, dans un circuit électrique, orienté du pôle négatif du générateur vers son pôle positif. Mais pour nous, par convention, ce sera l'inverse.

Reprenons notre exemple. Le courant qui parcourt le fil circule du pôle « + » de la pile au pôle « - ». On flèche donc le courant dans ce sens-là :

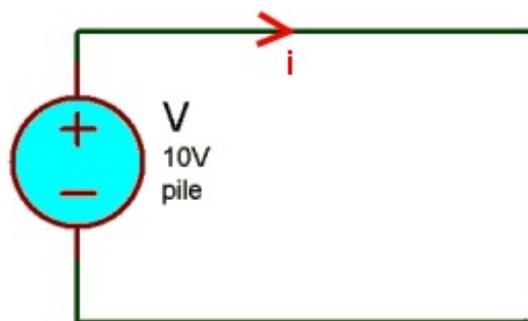


Figure 4 – Sens conventionnel du courant électrique à travers un matériau métallique

### Courant dans un métal

Dans un fil ou dans un câble métallique, le courant électrique peut circuler. En effet, le métal est un ensemble d'*atomes* (particules élémentaires) liés bout à bout. Ces atomes sont constitués :

- d'un *noyau* formé de particules nommées *protons*, chargées positivement, et de *neutrons* de charge nulle ;
- d'un nuage électronique composé d'*électrons* qui portent une charge électrique négative.

Quel que soit le matériau, les électrons (de charge négative) vont attirer et se faire attirer par les protons. Résultat : les électrons et les protons vont être si fortement attirés (comme des aimants) qu'ils vont rester tout le temps à une distance très petite les uns des autres. D'ailleurs, il faudra faire beaucoup d'efforts pour les éloigner.

C'est ainsi qu'est formé un atome.

Mais dans les métaux, tous les électrons ne sont pas aussi fortement attirés par les protons. Certains vont tranquillement se promener dans tout le matériau, faiblement attirés par les protons du matériau et vont se déplacer sous l'effet de la température.

Faiblement influencés par les noyaux, il est facile de les attirer par différents moyens et de les faire se déplacer de façon ordonnée de façon à créer un courant. Ce sont des **électrons libres**.

Dans un métal, le courant est un déplacement de ces électrons libres. Les autres électrons ne bougent quasiment pas et s'éloignent rarement de quelques milliardièmes de mètre de leur noyau. Dans ce même métal, le courant se déplace le plus souvent de la borne « - », remplie d'électrons, vers la borne « + ». Mais cela n'est vrai que dans les métaux.

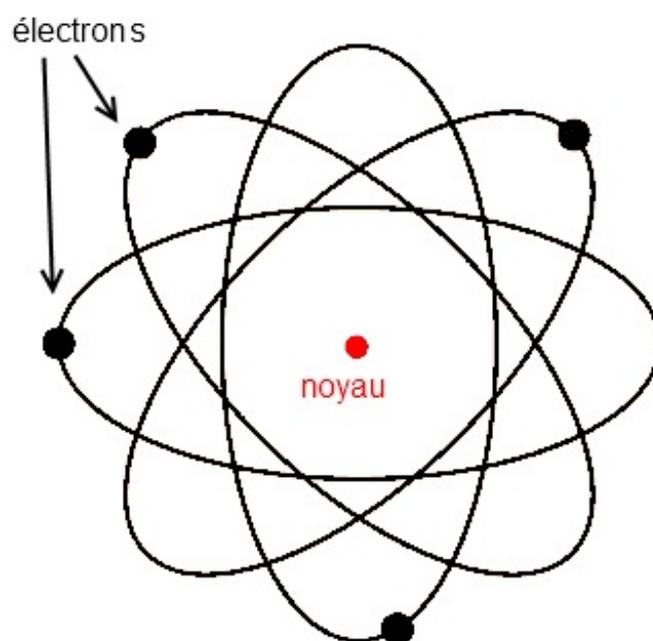


Figure 5 : Représentation d'un Atome et de son champ électronique

### Intensité du courant

Attention, ne négligez pas le point que je vais présenter, vous risqueriez d'être perdu pour la suite du cours !

Un courant qui circule (le carburant dans un tuyau dans notre analogie) va pouvoir déplacer plus ou moins de charges en un temps donné. Pour la pompe, on parle de son débit : c'est la quantité de carburant qu'elle va déplacer en une seule seconde pour alimenter le moteur.

Pour un générateur électrique, on a quelque chose d'équivalent. Il va mettre en mouvement un grand nombre de charges électriques. Ces charges iront plus ou moins vite, cela dépendra de la vitesse à laquelle elles seront « propulsées ». Suivant le

nombre de charges mises en mouvement et leur vitesse, on déplacera une plus ou moins grande quantité de charges électriques dans le circuit en un temps donné.

Ce débit de charges, c'est l'**intensité du courant électrique**.



Attention, il ne faut pas confondre courant avec intensité ! **Le courant est le déplacement de particules, l'intensité est le débit auquel on déplace ces particules.**

### Unité

Pour un fluide, tel notre carburant, on mesure son débit (préférez son intensité) en  $m^3/s$  (mètre cube par seconde). Pour mesurer l'intensité du courant électrique, on utilise une unité bien particulière qui se nomme l'**ampère**, du nom de son inventeur **André-Marie Ampère**. On note cette unité avec la lettre **A** (en majuscule, toujours !).

### Mesure de l'intensité

Bien sûr, tout comme les fluides, on peut mesurer la vitesse d'un courant électrique. Pour ce faire, on utilise **un ampèremètre** qui est un appareil spécialisé dans la mesure de l'intensité du courant.

### Ordres de grandeur

Un ordre de grandeur est une fourchette de valeurs. Il est employé pour communiquer sur des grandeurs allant de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Voici un tableau récapitulatif des ordres de grandeur de l'ampère utilisés en électronique :

Nom	Symbole	Puissance de 10	Commentaire
Ampère	A	$10^0$	Peu utilisé
Milliampère	mA	$10^{-3}$	Très utilisé
Microampère	$\mu$ A	$10^{-6}$	Souvent utilisé
Nanoampère	nA	$10^{-9}$	Peu utilisé
Picoampère	pA	$10^{-12}$	Rarement utilisé

### Représentation

Sur un schéma électronique, la représentation du courant se fait par une flèche orientée dans le sens théorique de circulation du courant. Reprenons notre ampoule alimentée par la pile :

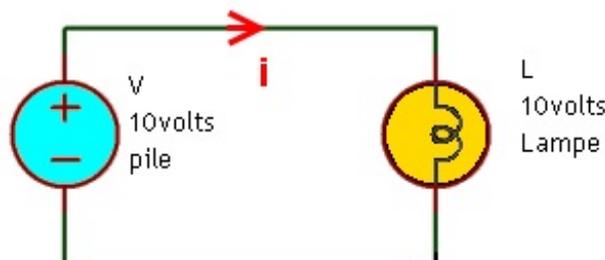


Figure 6 – Ampoule reliée aux bornes d'une pile

La flèche doit être orientée « sortante » à la sortie d'un dipôle et « entrante » à son entrée. Elle montre donc le sens conventionnel de circulation du courant, mais pas forcément son sens réel !

### Conservation de l'électricité

Maintenant, il faut savoir une chose importante : il ne peut pas y avoir création ou disparition de charges électriques dans un circuit électrique. C'est une loi physique très importante qui nous le dit et qui est nommée « la conservation de la charge électrique ». Et comme le dit si bien notre cher ami Antoine Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ! ».

On peut en déduire facilement que la somme des charges électriques sortant d'un générateur et parcourant un circuit électrique est égale à la somme des charges revenues à l'entrée du générateur. En clair, aucune charge n'a disparu en chemin.

Comprenez bien que si le carburant arrive au moteur avec une quantité inférieure à celle partant du réservoir, c'est qu'il y a une fuite ! Il en est de même avec un courant. Ce genre de fuite arrive de temps en temps, il faut donc la repérer puis la réparer.



Les paragraphes suivants ne sont pas nécessaires à la compréhension du cours. Ils ne sont là que pour ceux que cela intéresse. Vous pouvez donc vous rendre directement à la sous-partie « La tension ». Bien évidemment, libre à vous de revenir lire ce petit bout de chapitre plus tard. 😊

## Notions avancées : l'intensité, ça se calcule !

Eh oui, on trouve une formule pour tout ! Même en amour. Oui, oui ! 😊

Voyons comment cela se présente. Je vais vous expliquer plus précisément la nature du courant électrique. Pour cela, nous avons besoin de conditions.

Soit un courant constant et une quantité d'électricité qui parcourt une section d'un fil électrique. La formule qui suit permet de savoir quelle est la quantité de charges électriques qui ont circulé dans ce conducteur pendant une seconde :

$$I = \frac{Q}{T}$$

### Explications

- I : c'est l'intensité, en ampère.
- T : c'est le temps, en seconde.
- Q : c'est la charge électrique d'un électron, exprimée en coulomb.

Pour comprendre, entrons au cœur de la matière qui constitue chaque être vivant et non-vivant et parlons d'atomes. Nous l'avons vu, le noyau est le centre de l'atome, c'est autour de lui que gravitent les *électrons*. Ce noyau est composé de *protons* qui sont chargés positivement et de *neutrons* qui eux sont neutres, d'où leur nom !

La charge électrique d'un seul proton vaut  $1,67 \cdot 10^{-19}$  coulomb.

La charge électrique d'un seul électron vaut  $-1,67 \cdot 10^{-19}$  coulomb.

Un atome « normal » a autant de protons que d'électrons. En additionnant la somme de toutes les charges de l'atome, on trouve zéro (essayez...). Nous en déduisons que la charge électrique d'un atome est nulle ; on dit qu'il est *électriquement neutre*.

### Calcul

Revenons-en à la formule  $I = \frac{Q}{T}$

La quantité Q se mesure en coulomb, en hommage à ~~Christophe~~ à Charles-Augustin de Coulomb.

Si l'on veut connaître la quantité d'électrons qui est passée dans une section de fil électrique pendant une seconde, il va falloir modifier légèrement la formule de façon à donner ceci :  $Q = I \times T$

Calculons la quantité d'électrons qui ont parcouru la section d'un fil électrique pendant une seconde et avec une intensité du

courant égale à 1 ampère :

$$Q = I \times T$$

$$(Q = 1 \text{ ampere} \times 1 \text{ seconde})$$

$$Q = 1 \times 1$$

$$Q = 1 \text{ coulomb}$$

Nous savons à présent que la quantité de ces électrons est de 1 coulomb. Pour connaître le nombre d'électrons que cela représente, il faut réaliser un deuxième calcul. Je divise donc la quantité d'électrons par la valeur absolue de la charge d'un électron, ce qui nous donnera précisément le nombre d'électrons recherché.

$$\text{Nombre d'électrons} = \frac{1 \text{ coulomb}}{|-1,67 \cdot 10^{-19}|}$$

$$\text{Nombre d'électrons} = 5,988 \cdot 10^{18} \text{ électrons}$$

Le résultat est impressionnant ! Le nombre d'électrons qui ont parcouru la section du fil électrique pendant une seconde, et ce avec une intensité du courant égale à 1 ampère, est de quasiment 6 000 000 000 000 000 000 (soit six milliards de milliards d'électrons en **UNE** seconde) ! Autant dire que ça cogite dans un fil électrique ! Alors, imaginez le nombre que cela représente avec une prise électrique de 16A ! 😬

### Relation

Nous avons vu qu'il y avait 1 coulomb dans une section d'un fil électrique lorsqu'il y a une intensité de 1 ampère et ce pendant une seconde. Donc en une heure, combien y aura-t-il de coulombs ?

**Réponse** : 3 600 coulombs. Oui, car il y a 3 600 secondes dans une heure. Il y a donc 3 600C à 1A pendant une heure.

$$3\,600 \text{ coulombs} = 1 \text{ ampère par heure, écrit de cette façon : } 3\,600\text{C} = 1\text{Ah}$$

On s'arrête là avec les notions avancées car au-delà, l'utilité est moindre.

## La tension

### D'après l'analogie, qu'est-ce que la tension ?

Dans notre analogie, la zPompe va créer un courant dans le circuit. Pour cela, cette dernière va « pousser » le carburant dans le circuit pour le faire circuler. Cette poussée s'appelle la *pression*. Sans pression, il n'y a pas de carburant dans le circuit ! Il y a forcément quelque chose dans la zPompe qui va mettre le carburant en mouvement à travers tout le circuit et donc créer un courant.

Dans un circuit électrique, c'est semblable. Il y a quelque chose qui va déplacer nos charges dans tout le circuit sans qu'on ne leur ait rien demandé. Dans un fluide, ce qui met en mouvement le carburant, c'est la pression. Dans un circuit électrique, c'est la **tension**.

### Soyons plus précis

Dire que la tension déplace nos charges, c'est assez vague. Je vais tenter de vous donner une définition plus précise. Il va falloir parler d'énergie. Mais autant vous prévenir tout de suite : l'explication sera un peu longue et ne sera pas forcément intuitive au premier abord.

Dans notre circuit, les charges positives et négatives s'attirent et se repoussent en permanence. Ces attractions et répulsions vont donner de l'énergie pour chaque charge présente dans le circuit. Cette énergie s'appelle l'énergie potentielle électrostatique. Une grosse partie de cette énergie vient de l'influence des bornes « + » et « - » du générateur.

Cette énergie dépend uniquement de la position de la charge dans le circuit (qui nous dira si elle est plus ou moins proche des

bornes « + » et « - » du générateur). Ce qui fait qu'en un point A du circuit, notre charge Q aura une certaine énergie E (au point A), notée E(A). À un autre endroit B, elle aura une énergie E (au point B), notée E(B).

La tension entre les points A et B est égale à l'énergie notre charge en A, moins l'énergie de notre charge en B, le tout divisé par la valeur de la charge. Ce qui donne :

$$U = \frac{E(A) - E(B)}{Q}$$

Quand une particule se déplace dans un circuit électrique, cette énergie va varier et se transformer en vitesse (en énergie cinétique plus précisément, mais bon...).

Supposons que  $E(B) > E(A)$ , cette énergie perdue lors du passage de B à A est transformée en énergie cinétique qui va accélérer la particule ou la mettre en mouvement. C'est ainsi que notre charge va se mettre à accélérer.

Dans un générateur, la charge électrique va se déplacer d'une borne du générateur à l'autre et va gagner de l'énergie. Une fois arrivée à l'autre borne, toute son énergie potentielle va se transformer en énergie cinétique qui va accélérer notre charge et la faire circuler dans le circuit. Bien sûr, toute cette énergie gagnée lors du passage dans le générateur sera perdue lors du passage dans les différents récepteurs qui consommeront l'énergie gagnée par la particule.

### Unité

Comme toute grandeur électrique qui se vaut, elle a sa propre unité de mesure. C'est le **volt**, en hommage à [Alessandro Volta](#). Cette grandeur électrique est fréquemment notée avec les lettres suivantes : **V**, **U**, **E** ou **e**.

### Mesure

On mesure la tension avec un appareil spécialisé qui se nomme étonnamment **le voltmètre**. 🤪 Le branchement de cet appareil s'effectue aux bornes d'un dipôle ce qui permet de mesurer la tension aux bornes de ce même dipôle.

### Ordres de grandeur

Ils sont bien différents de l'ampère sur lequel on manipule de très faibles valeurs.

Ordres de grandeur du volt

Nom	Symbole	Puissance de 10	Commentaire
Volt	V	$10^0$	Très utilisé
Millivolt	mV	$10^{-3}$	Très utilisé aussi
Microvolt	$\mu$ V	$10^{-6}$	Rarement utilisé
Nanovolt	nV	$10^{-9}$	Réception d'un téléphone portable

### Notation

Sur le schéma, la tension représentée par la lettre sans indice U est associée à une flèche (de tension) dont la pointe se situe en P et la queue en M. Cela signifie :  $U = U_{PM}$

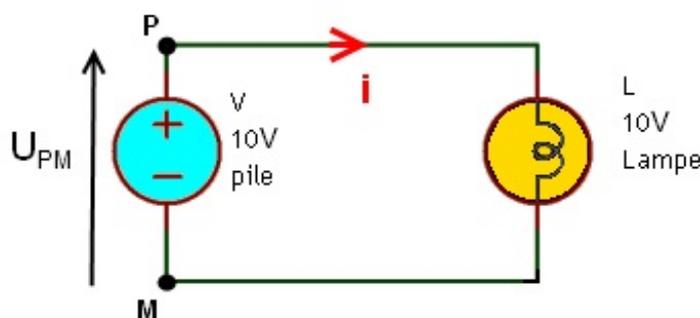


Figure 7 – Représentation de la tension par une flèche

### Pratique

Branchons le voltmètre aux bornes du dipôle (ici de la lampe), avec la borne positive du voltmètre au « + » de la pile et sa borne négative (appelée COM) au « - ». Ce dernier va nous indiquer la tension  $U_{PM}$ . Cette tension est de 10V.

Nous avons donc une tension entre le point P du circuit et le point M, qui se note  $U_P - U_M = 10V$ , soit  $U_{PM} = 10V$ , car le point M est à 0V et le point P à 10V.

À présent, inversons le sens de branchement du voltmètre. Il affiche désormais : -10V. On le note alors  $U_M - U_P = -10V$ , soit  $U_{MP} = -10V$  (car : 0V - 10V = -10V).

La tension est donc négative ou positive selon notre choix, ceci est dû au fait que la masse est choisie arbitrairement...

### La masse : une référence

On a donc notre tension qui est une différence entre deux énergies. Jusque-là, pas de problème. Mais cette différence, elle est faite par rapport à quoi ?

Un référentiel est un point que l'on définit comme étant la référence. Cela ne vous avance pas beaucoup.

### Notion de référentiel

Lorsque l'on prend une mesure, on fixe un point qui va nous permettre de prendre cette mesure. C'est le référentiel.

Prenons pour exemple le mont Blanc, qui est le plus haut sommet d'Europe. Eh bien sa taille (j'arrondis puisqu'elle varie en permanence) est de 4810 mètres par rapport au niveau de la mer. Vous vous êtes donc référencé au niveau de la mer pour le mesurer. Mais du haut de ce sommet, le niveau de la mer est à -4810 mètres (on peut également dire que la mer est à 4810 mètres sous nos pieds). La référence a changé : ce n'est plus le niveau de la mer mais le sommet du mont Blanc.

Idem lorsque vous vous mesurez. De vos pieds à votre tête, vous mesurez 1,60 mètre (pas tout le monde évidemment !). Mais si vous êtes au 45<sup>ème</sup> étage d'un immeuble (j'exagère un peu), eh bien par rapport au rez-de-chaussée, le sommet de votre tête est à 136,6 mètres ! (Calcul : 45 étages x 3m + 1m60.) Vous avez donc délaissé vos pieds qui étaient la référence pour choisir le rez-de-chaussée.

La référence est donc un choix arbitraire, c'est pour cela que l'on parle d'une référence et pas de la référence.



Pourquoi tu nous parles de nos pieds, du Mont Blanc et d'un immeuble de 45 étages ?

Pour la simple et bonne raison que ce sont des mesures et que l'on procède de la même manière avec des tensions. On les mesure par rapport à une référence qui est, pour un circuit électronique, la masse !

### La masse

Dans la sous-partie sur la tension, j'ai parlé de masse car c'est le point de référence qui permet de mesurer la tension. C'est le 0 volt du circuit.

### Représentation

La masse est représentée dans un circuit par ce symbole qui peut légèrement différer selon les schémas. Elle est toujours pointée

vers le bas :



Figure 8 – Représentation schématique de la masse

La terre est représentée ainsi, nous allons voir ce que c'est :

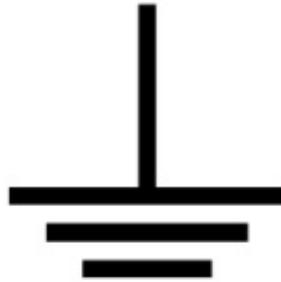


Figure 9 – Représentation schématique de la terre

### Référence absolue ?

Absolument pas !

La masse est, je l'ai dit, une référence dans un circuit. On peut très bien prendre 10V comme référence, ce qui nous amène à avoir -10V à la place de la masse ! (Cf. la tension => pratique) 😊 Cependant, il faut le souligner, la masse aura toujours un potentiel zéro car on ne pourra jamais mesurer de différence de mesure entre elle et elle-même (dans un même circuit).



Mais attention, ce n'est pas parce qu'on ne peut pas mesurer de différence de tension entre elle et elle-même qu'elle n'a pas de différence de tension entre elle et la masse d'un autre montage. Par exemple, sur un montage A, la masse à un potentiel 0V. Sur un montage B, -10V est défini comme étant la masse du circuit. Eh bien entre chacune des masses des montages A et B, on pourra mesurer une différence de tension.

### La masse et la terre

Sur les prises de l'installation électrique de votre maison ou de votre appartement, il y a une fiche (un embout métallique) qui sort. Cette fiche est reliée à la terre (entendez le sol). Eh bien la terre est une référence, mais elle est différente de la masse, car ces deux références ne sont pas communes. Si vous voulez, tant qu'elles ne sont pas reliées entre elles, elles seront différentes. Mais si par malheur elles venaient à se connecter ensemble, il pourrait y avoir de graves conséquences pour vous.

En fait, comme je l'ai dit, le choix de la masse est totalement arbitraire. Elle n'est définie que parce qu'on lui a demandé d'être comme elle est. Elle diffère donc entre chaque montage. On peut alors mesurer une différence de tension entre la masse et la terre.

### La puissance

Plus haut, dans la partie sur la tension, on a parlé d'énergie.

Sachez que l'énergie peut prendre une multitude de formes. Par exemple, elle peut devenir une énergie thermique, lumineuse, mécanique, électrique, cinétique, chimique, etc. Dans un système, il n'est pas rare que l'énergie se transforme et passe d'une forme à une autre.

C'est ce qui se passe dans une pile : celle-ci crée une tension dans un circuit. Pour cela, elle utilise des réactions chimiques qui vont libérer un peu d'énergie et l'utiliser pour créer un déséquilibre de charges électriques afin de charger ses bornes « + » et « - ».

### Effet joule

Dans nos circuits électriques, un phénomène assez ennuyeux survient.

Lorsqu'un conducteur métallique ou un semi-conducteur est traversé par un courant, il chauffe, et ça, c'est inévitable. Une partie de l'énergie électrique transportée par le courant est transformée en chaleur. C'est ce qu'on appelle **l'effet joule** (encore du nom de son inventeur !).

La zPompe, qui est un moteur, connaît bien ce phénomène de transformation d'énergie électrique en énergie thermique (chaleur) et mécanique (rotation d'un axe). En effet, la zPompe a besoin d'électricité pour fonctionner, mais au fil du parcours de l'électricité dans la zPompe, l'énergie se transforme et devient une énergie mécanique (rotation de l'axe de sortie) car c'est sa fonction principale. Une partie de cette énergie mécanique sera transformée en énergie thermique (chaleur) à cause des frottements de l'air et des pièces mécaniques. Ce phénomène est indéniable.

### *Conservation de l'énergie, on y revient !*

Mais dans tous les cas, zPompe ou pas, il n'y a pas création ou disparition d'énergie. On dit aussi que l'énergie est une grandeur conservée. La conservation de l'énergie est une loi fondamentale de la physique, il ne faut en aucun cas la négliger ! Souvenez-vous-en !



Bon, c'est bien beau, mais ça sert à quoi de savoir ça ?

Résumons par ce schéma :

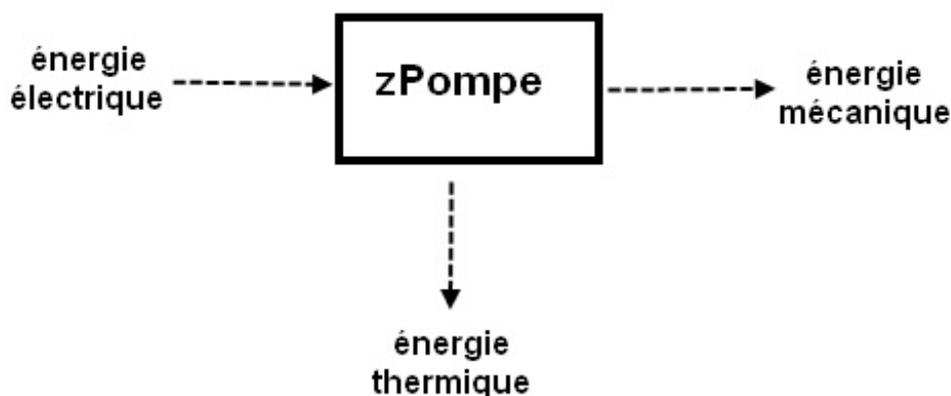


Figure 10 – Représentation des pertes énergétiques

Le tout n'est pas de savoir quelles sont les formes que prend l'énergie dans un système mais de vérifier la loi suivante : **L'énergie totale consommée par un système est égale à la somme des énergies restituées par ce même système.**

Autrement dit, s'il y a une énergie moins forte à la sortie d'un système qu'à son entrée, c'est que le système crée des pertes énergétiques (pour la zPompe, ce sont les pertes par énergie thermique). Cependant, il n'existe à ce jour aucun système qui restitue entièrement l'énergie absorbée (en entrée) en énergie utile (en sortie). Ou bien si, il en existe, mais il est nécessaire d'utiliser des supraconducteurs.

C'est pourquoi lorsque vous avez un système, il y a des pertes (en électronique, c'est souvent à cause d'un échauffement des composants).

### *Quelques informations sur les pertes énergétiques*

En électronique, le ralentissement des avancées technologiques se fait ressentir à cause de la puissance qui est *dissipée* dans un système (chaleur). Dans un ordinateur, par exemple, le cœur qui le fait fonctionner (le processeur) est très puissant au niveau des performances de calcul, mais il est aussi très gourmand en énergie et a besoin d'un bon radiateur avec ventilateur pour le refroidir, sous peine de le faire griller. C'est pourquoi les performances de ces derniers « stagnent » et évoluent de moins en moins. Pour franchir ce palier, d'autres approches technologiques orientent les recherches vers des matériaux qui consomment moins. Ce domaine est celui de la microélectronique et de nombreux emplois sont à pourvoir. 😊

## Puissance

La puissance :

- c'est à la fois l'énergie consommée par un système (en général sous forme de chaleur, mais aussi sous forme mécanique ou lumineuse) ;
- c'est aussi l'énergie maximale qui peut être fournie par un système (par exemple la zPompe).

La puissance est par conséquent la quantité d'énergie que peut fournir un système à un autre système durant un temps donné. Prenons pour exemple un vélo. Vous devez fournir une puissance plus importante à chaque fois que vous augmentez le cran des vitesses pour aller plus vite, et ce sans trop vous fatiguer.

En électronique, la puissance est définie par la relation entre l'intensité et la tension par cette formule :

$$P = U \times I$$

Cette formule n'est toutefois que partiellement vraie : il faudra ajouter quelques petites subtilités dans la suite du tutoriel, lorsque l'on verra des tensions ou des courants qui varient dans le temps.

### Unité

La puissance se calcule en **watts**, du nom de **James Watt**. Elle peut se mesurer grâce à un wattmètre (surprenant, n'est-ce pas ?) ou peut se calculer avec la formule précédente.

Un watt est égal à un joule (unité de l'énergie) par seconde :

$$1W = 1J/s$$



Cette dernière formule n'est pas essentielle et ce n'est pas grave si vous l'oubliez. 😊

### Ordres de grandeur

Ordres de grandeur du watt

Nom	Symbole	Puissance de 10	Commentaire
Watt	W	$10^0$	Très utilisé
Milliwatt	mW	$10^{-3}$	Très utilisé aussi
Microwatt	$\mu$ W	$10^{-6}$	Rarement utilisé

On a enfin terminé ce chapitre ! Si vous ne comprenez pas certains points, n'hésitez pas à le relire avant de commencer le chapitre suivant ! Autrement, vous risqueriez d'être perdu pour la suite.

## Application

L'électronique a recours à des schémas électriques pour pouvoir la comprendre et la concevoir. Il existe des règles simples qu'il faut maîtriser pour être compris par tous (toutes langues confondues). Rassurez-vous, je ne vais pas vous faire un cours d'anglais car de toute façon, je ne sais pas aligner trois mots en anglais ! 🤪

Nous allons voir ensemble, dans ce chapitre, comment lire et écrire un schéma, ce qui est la base en électronique. Cela nous prendra pas mal de temps. Pour terminer, nous reviendrons sur les types de générateurs et de récepteurs qui existent.

### Lecture et écriture d'un schéma

#### Un peu de vocabulaire

Comme en informatique ou en mathématiques, l'électronique possède un vocabulaire qui lui est propre. Voyons un peu celui qui va nous intéresser pour nos débuts.

Les composants d'un circuit sont :

- le **générateur**, un dipôle qui fournit de l'énergie électrique dans un circuit ;
- le **récepteur** qui reçoit quant à lui l'énergie électrique dans un circuit ;
- le **dipôle**, un élément du circuit qui possède deux bornes. En général, les dipôles sont des récepteurs.

Lois sur les fils et leurs liaisons :

- un **nœud** est une connexion qui relie au moins trois fils ;
- une **branche** est une portion de circuit (un fil) comprise entre deux nœuds consécutifs ;
- une **maille** est un chemin fermé, formé d'un ou de plusieurs fils (ou branches) et de dipôles dans un circuit électrique.

Lois concernant les dipôles :

- deux dipôles sont en **série** lorsqu'ils appartiennent à la même branche ;
- deux dipôles sont en **dérivation** (ou en **parallèle**) lorsqu'ils forment une maille.

Pour résumer, voici un schéma que j'ai annoté du vocabulaire présenté ci-dessus :

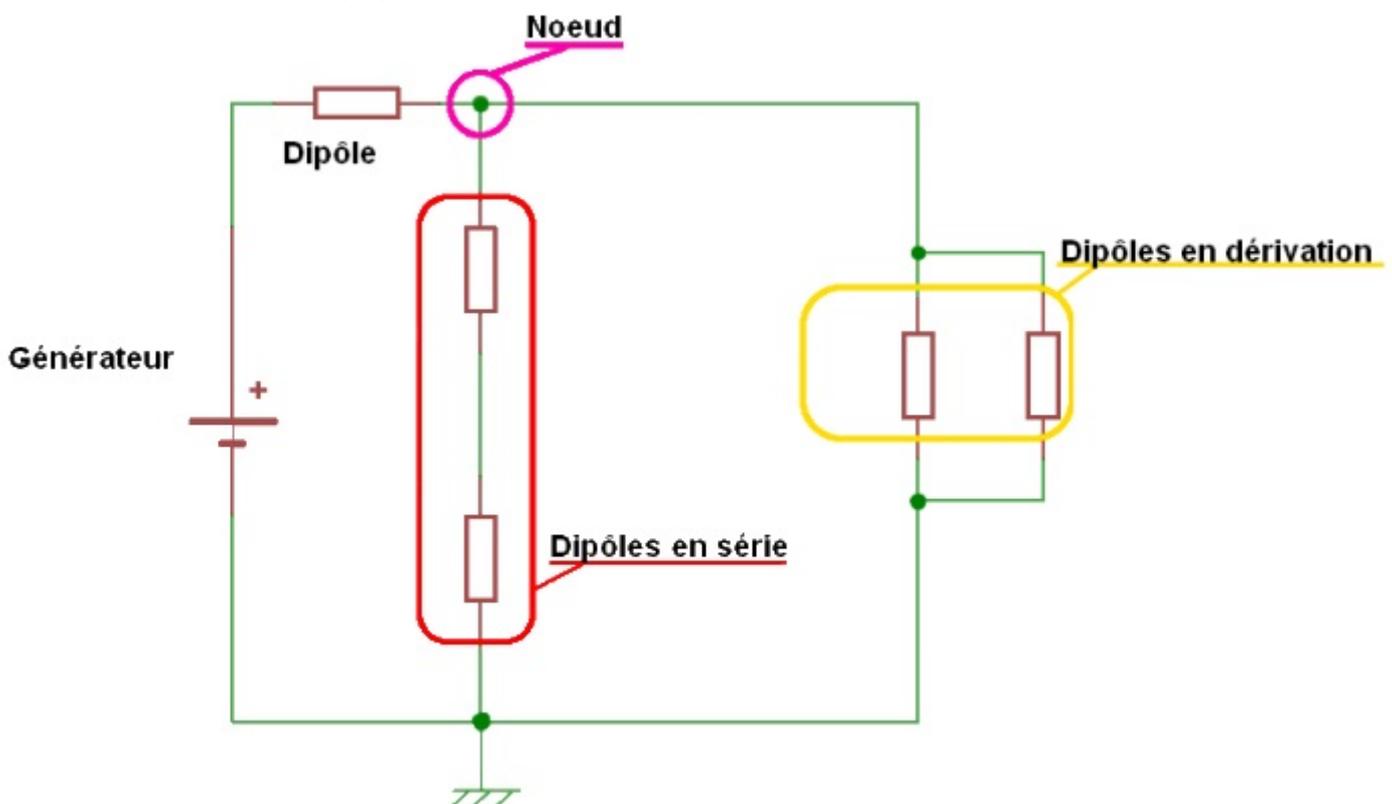


Figure 1 – Schéma électrique

### Quelques remarques

Le générateur dans un schéma électrique est toujours, je dis bien toujours, placé à gauche. Ni en haut, ni en bas, ni à droite. En effet, pour un électronicien, un schéma électrique est comme un livre qui se lit de gauche à droite et de haut en bas.

La masse d'un circuit est toujours placée vers le bas. Même si elle n'est pas en bas du circuit, son symbole est toujours (je me répète) orienté vers le bas (les traits obliques).

Autre détail : faites attention aux courts-circuits ! Même si ce n'est pas toujours dangereux ou mortel pour le circuit (décidément, on ne se quitte plus), cela peut l'endommager ou bien l'empêcher de remplir correctement sa fonction. C'est souvent la première source de problèmes dans un montage qui ne fonctionne pas, d'autant plus que son dépiage est difficile (mais pas impossible).

## Courant et tension

Dans tout dipôle, quel qu'il soit, du courant va circuler. Le courant va donc entrer par une borne du dipôle et sortir par l'autre. La borne du dipôle par laquelle le courant va entrer est appelée **l'entrée** du dipôle. L'autre borne est appelée **la sortie**.

Pour éviter certains problèmes, il faut respecter des conventions qui nous précisent le sens dans lequel on doit dessiner la tension et le courant dans un circuit.

### Convention générateur

Pour un générateur, la tension et le courant sont dans le même sens.

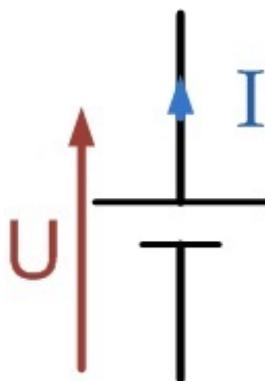


Figure 2 – Convention générateur

C'est une règle à respecter absolument. Cette règle est purement conventionnelle, on aurait très bien pu faire l'inverse, mais c'est cette convention qui a été choisie.

### Convention récepteur

Pour un récepteur, c'est exactement l'inverse : la tension et le courant vont dans le sens contraire car le récepteur reçoit du courant. La tension, quant à elle, ne se flèche pas dans le sens inverse.

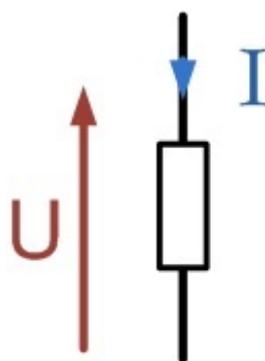


Figure 3 – Convention récepteur

## Branchement en série et en parallèle

Évidemment, on n'utilise presque jamais de circuits ne comprenant qu'un seul dipôle et un générateur. Il faut souvent placer dans le même circuit plusieurs récepteurs, et pour cela, on va devoir relier nos récepteurs et générateur(s) entre eux.

Pour relier deux récepteurs entre eux, on dispose de deux moyens :

- les relier en série ;
- les relier en parallèle (en dérivation).

### Branchement en série

Nous en avons vu un exemple tout à l'heure. En voici un autre :

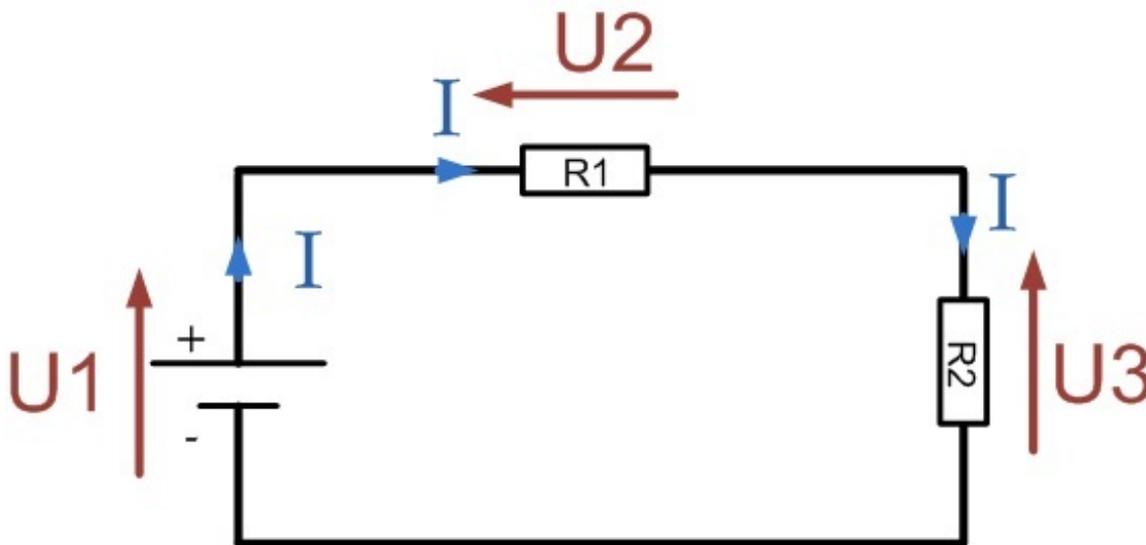


Figure 4 – Montage avec un générateur et deux résistances en série

Dans un circuit (ou une partie d'un circuit) où les dipôles sont en série, il n'existe qu'un seul parcours pour le courant. Celui-ci est alors égal en tout point du circuit.

### Branchement en parallèle

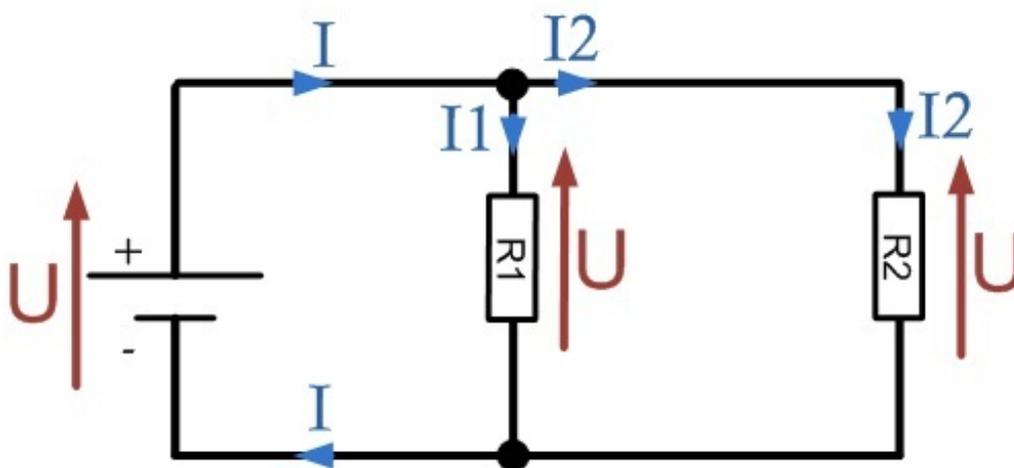


Figure 5 – Montage avec un générateur et deux résistances en parallèle

Plus compliqué cette fois, et pour cause : il y a deux parcours possibles pour le courant. Il ne choisira pas une branche ou une autre, mais les deux ! Il va en effet se répartir (pas forcément de manière égale) dans chacune des branches et se recombinaison en un seul courant lorsqu'il aura traversé ces deux branches. On dit alors qu'il y a trois mailles dans le circuit.

### Qu'est-ce qu'une maille ?

Une maille est une portion de circuit fermé partant d'un point et revenant à son point de départ.

Pour trouver une maille dans un circuit, tentez ceci : prenez un endroit du circuit, n'importe lequel. Si vous suivez les fils du circuit en traçant un chemin et que vous revenez à votre point de départ, alors le trajet que vous avez suivi constitue une maille.

Reprenons le montage précédent et traçons les mailles :

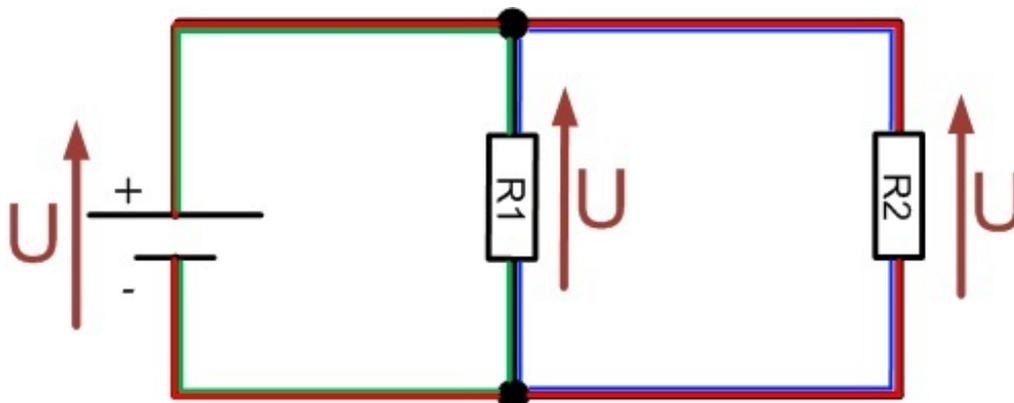


Figure 6 – Trois mailles identifiées (rouge, bleu et verte)

## Les générateurs

Vous savez ce qu'est un générateur, mais ce que vous ne savez peut-être pas, c'est qu'il existe deux types de générateurs différents :

- les générateurs de tension ;
- les générateurs de courant.

### Le générateur de tension

On parle aussi de source de tension. Son rôle est de créer une tension à ses bornes. C'est cette tension qui agira sur les charges d'un circuit et qui créera un courant dans tout le circuit. En général, on représente notre source de tension comme ceci :

Batterie	Sources de tension continue

Figure a.1 – Symboles schématiques pour les sources de tension continue

Néanmoins, on peut parfois trouver un autre symbole pour les piles et les accumulateurs.

### Le générateur de courant

Comme son nom l'indique, un générateur de courant crée un courant. Original, non ? On représente notre source de courant comme ceci :

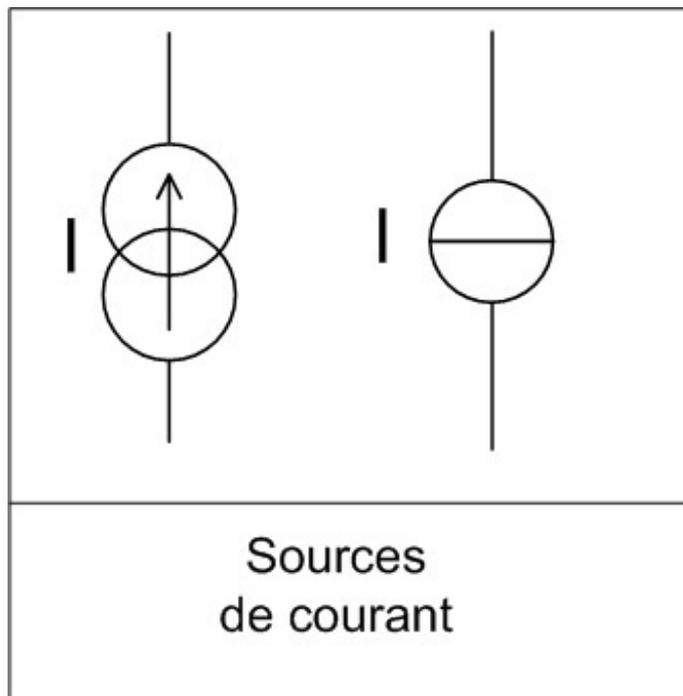


Figure a.2 – Symboles schématisés pour les sources de courant

### Générateurs continus

En électronique, on travaille uniquement avec des tensions et des courants. Et pour commencer sur de bonnes bases, il faut absolument commencer par parler d'une distinction fondamentale : la différence entre continu et alternatif.

Certains générateurs peuvent fournir une tension ou un courant variables. C'est-à-dire que la valeur de la grandeur physique fournie n'est pas la même à un temps  $t=0$  et un temps  $t=1,5s$ , par exemple. Une pile ne peut fournir qu'une tension constante tandis que le secteur électrique fournit une tension variable.

#### Tension continue

En continu, la tension fournie par le générateur garde une valeur constante. Elle ne varie pas au court du temps. C'est le cas le plus simple.

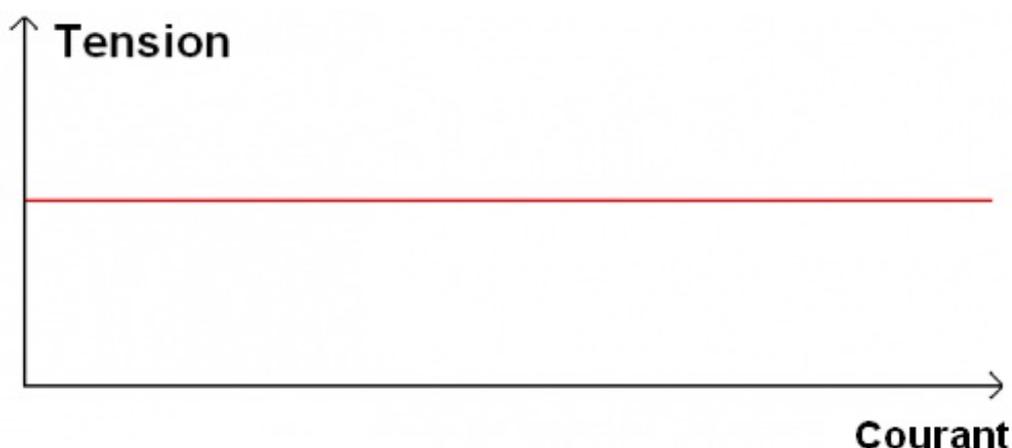


Figure 7 – Tension continue

En fait, ce type de générateur fournit une tension constante et ce quel que soit le besoin du circuit en courant électrique. Par exemple, le générateur fournit une tension de 10V, eh bien si le montage a besoin de 1mA, le générateur fournira du 10V à 1mA. Maintenant, si le montage a besoin de 40A, le générateur fournira du 10V à 40A !

### Courant continu

Pareil que pour la tension continue, mais là, quelle que soit la tension demandée, le courant reste identique.



Figure 8 – Courant continu



Dans la suite du cours, les schémas auront pour source d'énergie des générateurs idéaux.

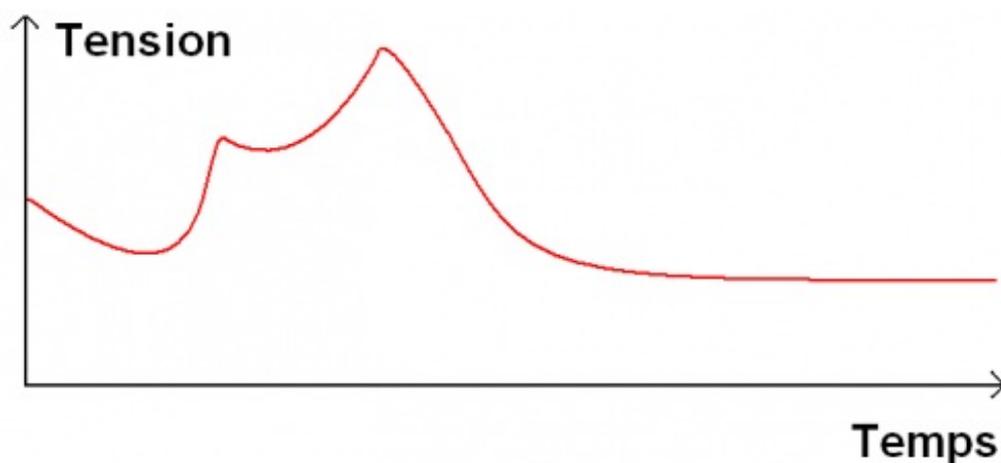
### Générateurs non continu

Les générateurs non continu, nous l'avons vu, sont des générateurs qui fournissent une grandeur physique qui a la faculté de varier au cours du temps. Il en existe deux types : les **générateurs variables** et les **générateurs périodiques**.

### Signal quelconque

Un générateur variable fournit un courant et/ou de la tension qui varient au court du temps. On appelle cela des **signaux électriques**.

Voici un exemple de signal électrique dont la forme est arbitraire :

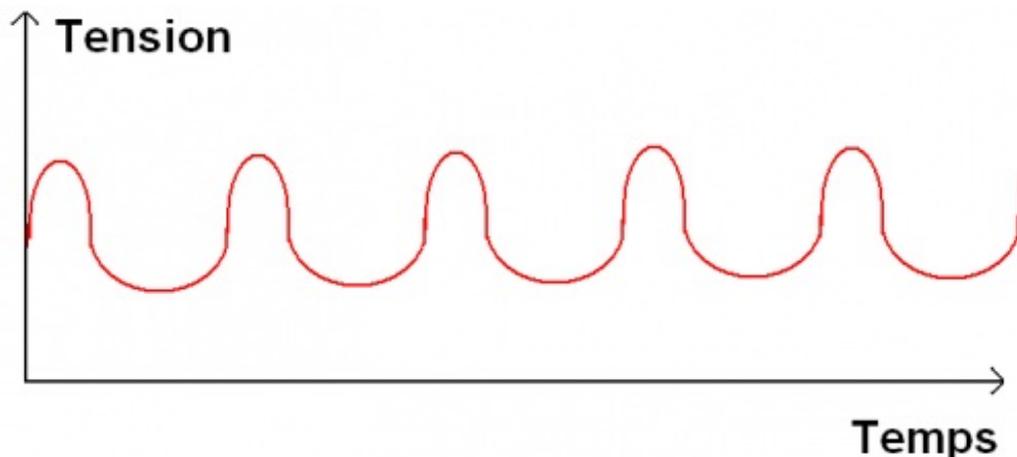


Ici, c'est la tension qui varie, mais cela aurait très bien pu être le courant.

## Générateurs périodiques

Ces générateurs fournissent des signaux qui varient au cours du temps, mais qui ont la particularité de se répéter cycliquement, c'est-à-dire qu'ils ont une forme de base qui se répète un certain nombre de fois par seconde. On appelle de tels signaux des **signaux périodiques**.

Voici un exemple :



### Propriétés

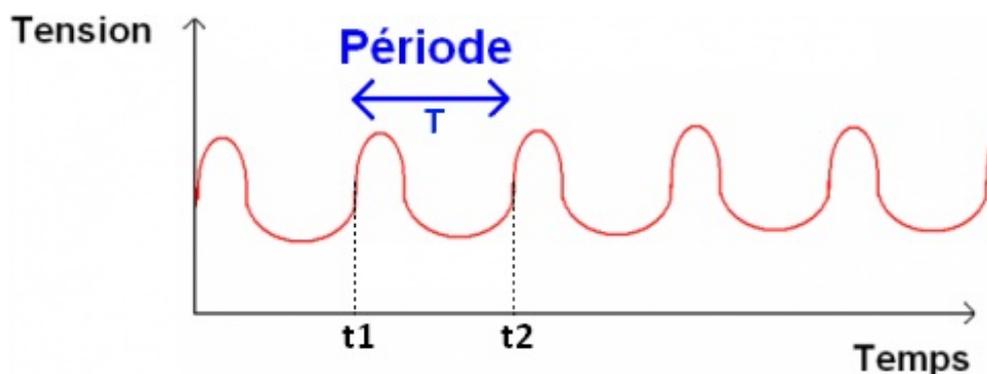
Ces signaux possèdent des caractéristiques importantes que n'ont pas les autres signaux et qu'il faut connaître à tout prix :

- la fréquence ;
- la période ;
- l'amplitude crête et crête à crête ;
- le rapport cyclique.

### La période

Commençons judicieusement par la période.

La **période** est la forme du signal qui se répète au cours du temps. Pour la définir, il faut en fait partir d'un point du signal, parcourir ce signal jusqu'à retomber au même point, mais avec un temps de décalage. Plus précisément, ces points auront la même ordonnée mais une abscisse différente. L'espace de temps entre ces deux abscisses est ce qu'on appelle la **durée** de la période. On note souvent cette durée  $T$  et on l'appelle souvent période par abus de langage.



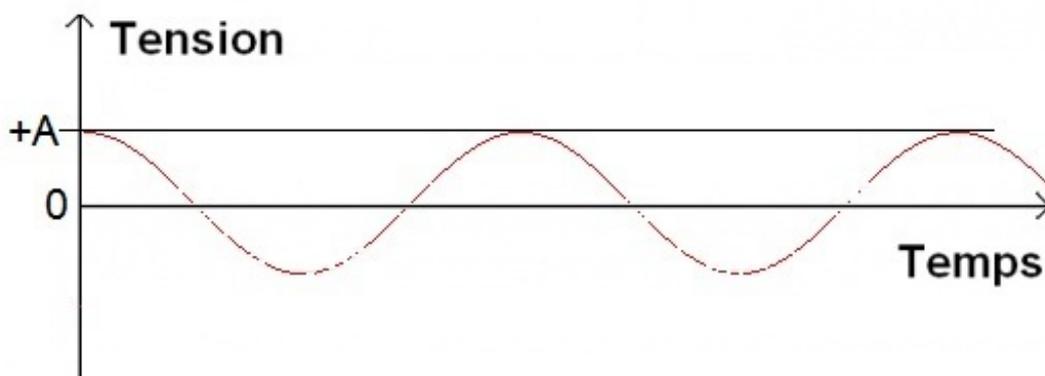
La durée de la période correspond à :  $T = t_2 - t_1$

### La fréquence

- La fréquence d'un signal est simplement le nombre de fois qu'un signal va se répéter par seconde.
- L'unité de la fréquence est le hertz.
- La fréquence d'un signal se note souvent  $f$  (simple, non ?).
- Cette fréquence peut se calculer à partir de la durée de la période  $T$ . En effet, la fréquence vaut  $\frac{1}{T}$ .

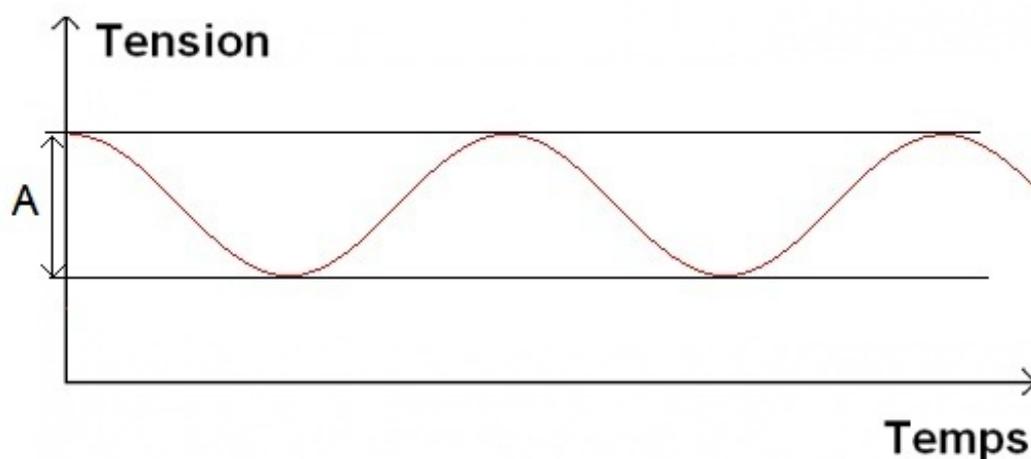
### L'amplitude crête

L'**amplitude** maximale est la valeur maximale atteinte par notre signal durant un cycle.



### L'amplitude crête à crête

Lorsque notre tension varie, elle varie entre une valeur maximum et une valeur minimum. La différence entre ces deux valeurs se nomme l'amplitude crête à crête.



### Le rapport cyclique

On remarque que, durant une période, le signal reste à sa valeur maximale pendant un certain temps. On appelle le rapport entre ce temps et la période le **rapport cyclique**.

## Les formes connues de signaux

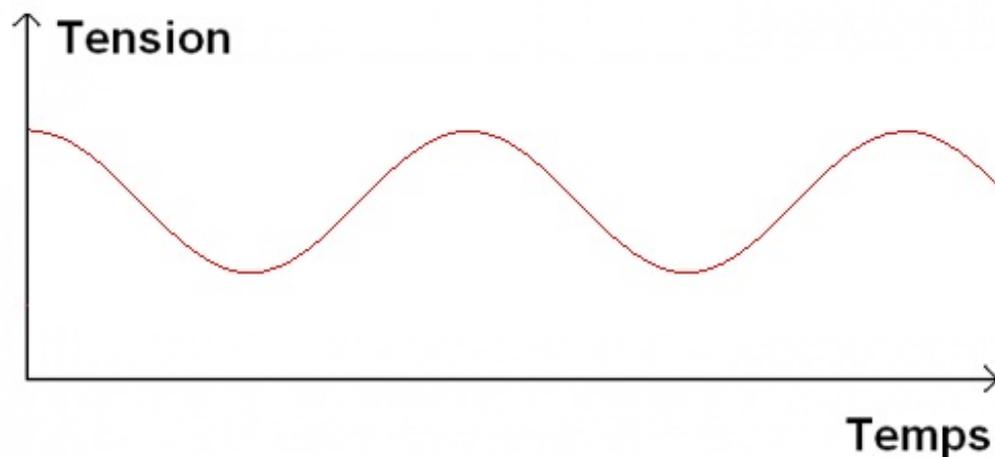
Il existe toute une panoplie de signaux périodiques (sinusoïdaux, créneaux, triangulaires, ...), mais seule une partie d'entre eux ont un réel intérêt, car ce sont eux qui sont majoritairement employés.

On va donc se concentrer sur trois types de signaux :

- les signaux sinusoïdaux ;
- les signaux triangulaires ;
- les signaux carrés.

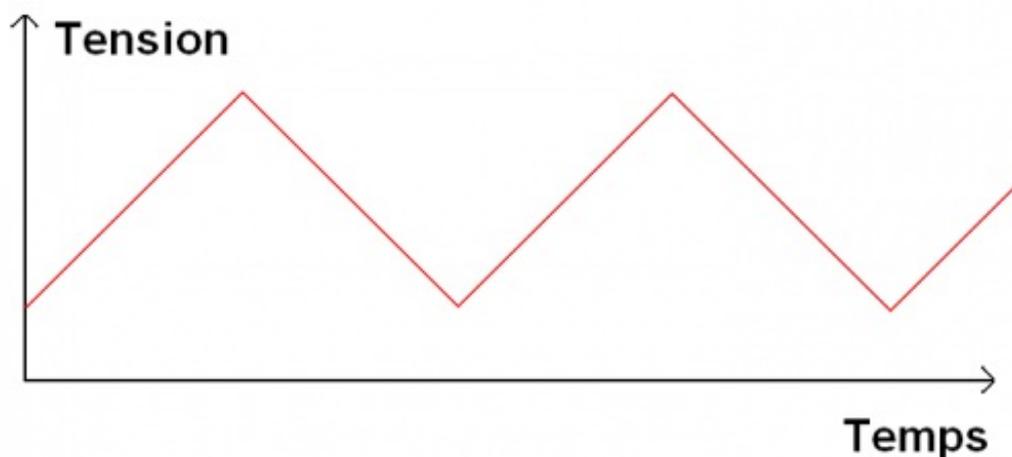
### *Le signal sinusoïdal*

Un signal dit sinusoïdal dessine une jolie vague que l'on appelle une **sinusoïde**. Voici à quoi cela ressemble :



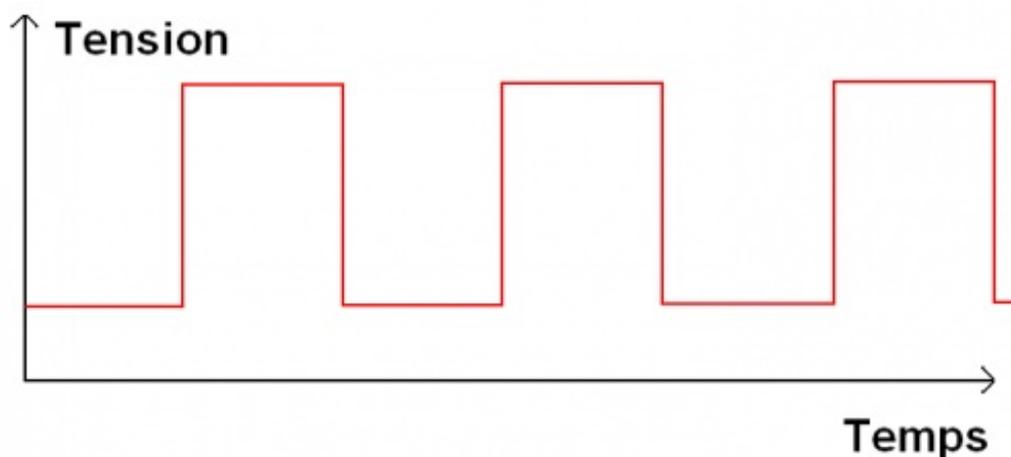
### *Le signal triangulaire*

La forme de la période est ici un triangle :



### *Le signal carré*

Ce genre de signal est très utilisé, notamment pour synchroniser des circuits qui doivent communiquer entre eux :



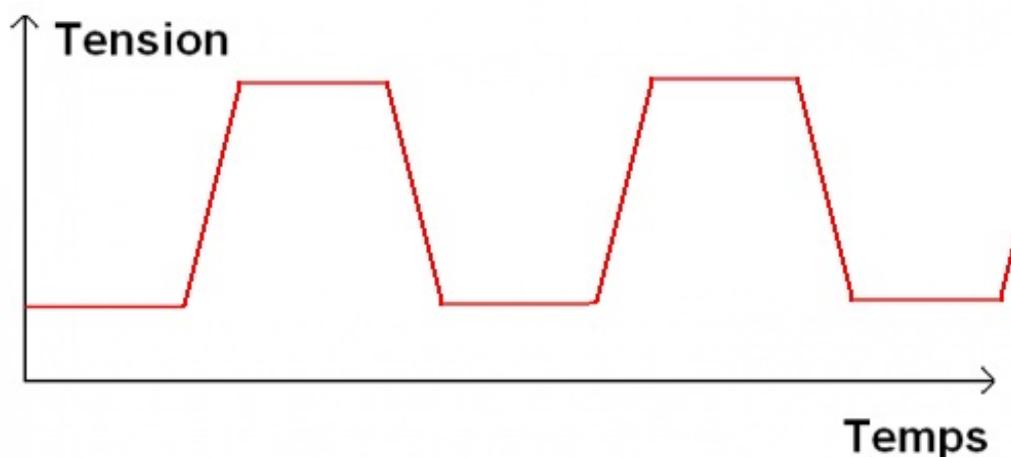
Ce signal peut donc prendre deux valeurs :

- une valeur maximale ;
- une valeur minimale.

Dans la réalité, le courant et la tension ne passent pas immédiatement de la valeur minimale à la valeur maximale. Il y a un certain temps de latence, nommé le **temps de montée**, durant lequel la tension et le courant vont progressivement passer de la valeur minimale à la valeur maximale.

De même, il y a aussi un **temps de descente** durant lequel la tension passe de sa valeur maximale à sa valeur minimale.

En dilatant le signal précédent, on obtient ceci :



Pourquoi cela ne passe-t-il pas directement de la valeur maximale à la valeur minimale ?

La réponse est simple : **chaque signal est une fonction du temps**. En mathématiques, une fonction n'est définie que si elle n'est pas *disjointe*, c'est-à-dire qu'elle ne peut pas avoir deux points dont l'abscisse est la même.

### Les récepteurs

Un récepteur, nous l'avons entrevu, est un dipôle qui va simplement se faire traverser par un courant et réagir en conséquence.

Les récepteurs sont classés en deux catégories :

- les composants passifs ;
- les composants actifs.

## Les récepteurs passifs

Les composants dits passifs sont des composants électroniques qui ne permettent aucune amplification du signal appliqué sur leur entrée.

### *Composants linéaires*

Un composant linéaire ne fait subir aucune déformation au signal qui lui est appliqué sur son entrée. En revanche, certaines propriétés du signal appliqué peuvent être modifiées (amplitude, phase).  
En clair, le composant multiplie la valeur du signal et peut éventuellement décaler celui-ci, mais il ne fait rien de plus.

On peut citer les composants passifs linéaires suivants :

- la résistance ;
- le condensateur ;
- la bobine ;
- l'ampoule (qui est en fait une résistance qui crée de la lumière).

### *Composants non linéaires*

Inversement par rapport aux composants linéaires, les non linéaires déforment en partie le signal qui est appliqué à leur entrée. Seule la diode possède cette caractéristique.

## Les récepteurs actifs

Contrairement aux récepteurs passifs, les récepteurs actifs peuvent amplifier un signal appliqué sur leur entrée.

### *Composants linéaires et non linéaires*

J'ai regroupé les deux catégories car il y a deux fonctionnements possibles pour lesdits composants. En effet, dans une fourchette de valeurs, le signal peut être amplifié sans être déformé en sortie. Mais passé ces valeurs, le composant actif ne remplit plus sa fonction et déforme le signal ou même ne l'amplifie plus. On peut citer :

- le transistor ;
- l'amplificateur opérationnel.

## Lois fondamentales

Dans votre exploration du domaine de l'électronique, vous allez vite comprendre (si ce n'est pas encore le cas) qu'il s'agit de mathématiques. 😊 Ne vous en allez pas tout de suite ! Ici, nous n'aborderons que des notions faisant appel aux divisions, multiplications, additions et soustractions.

Dans cette partie, nous allons discuter des lois relatives à un circuit électrique élémentaire (élémentaire signifie composé d'une source et d'une ou plusieurs charges, et bien évidemment, de fils électriques).

Cette partie est fondamentale et vous permettra de comprendre une très grande partie de l'électronique analogique. Attaquons donc le vif du sujet sans plus tarder. 😊

### Introduction

Je vous propose de faire une brève introduction historique afin de vous présenter les fondateurs des lois de l'électronique (et même de l'électricité en général) :

#### Citation : Wikipédia

**Georg Simon Ohm**, né le 16 mars 1789 à Erlangen Allemagne et mort âgé de 65 ans le 6 juillet 1854 à Munich, était un physicien allemand ayant étudié à l'université d'Erlangen.

En tant que professeur d'université, Ohm commence ses travaux de recherche par une étude sur la cellule électrochimique, récemment inventée par Alessandro Volta. En utilisant du matériel de sa propre invention, Ohm détermine qu'il y a une relation de proportionnalité directe entre la différence de potentiel appliquée aux bornes d'un conducteur et le courant électrique qui le traverse, ce qu'on appelle maintenant la loi d'Ohm. Utilisant ses résultats expérimentaux, il détermine les relations fondamentales entre courant, tension et résistance électrique, ce qui constitue le départ de l'analyse des circuits électriques.

#### Citation : Wikipédia

**André-Marie Ampère**, né à Lyon le 20 janvier 1775 et mort à Marseille le 10 juin 1836, est un mathématicien et physicien français. Il inventa le premier télégraphe électrique et, avec François Arago, l'électroaimant. Il énonça en 1827 la théorie de l'électromagnétisme. Son nom a été donné à l'unité internationale du courant électrique : l'ampère.

**Une de ses inventions** : il a inventé le galvanomètre, le premier télégraphe électrique et, avec Arago, l'électroaimant. Grâce à Ampère se firent connaître les termes « courant électrique » et « tension électrique ». Il nous laisse aussi des empreintes profondes dans les domaines des mathématiques, de la chimie et de la botanique.



#### Pourquoi s'intéresser à ces grandeurs physiques ?

Vous savez sûrement qu'une prise de courant murale (que vous avez chez vous) délivre une tension de 230V (en courant alternatif) et que si vous essayez d'y brancher un appareil conçu pour fonctionner en 120V, cela détériorera votre appareil (il y a d'ailleurs des chances pour que vous observiez une petite explosion accompagnée d'une odeur de plastique brûlé).

Sachez que chaque appareil est conçu pour fonctionner à une tension que l'on appelle sa tension nominale.

Dans le domaine de l'électronique, il en est de même : chaque composant fonctionne avec une tension nominale sous un courant nominal que le constructeur nous donne et qu'il faut respecter (il y a d'autres paramètres mais ceux qui nous intéressent ici sont le courant et la tension).

Par conséquent, nous sommes dans l'obligation de connaître précisément les tensions et courants qui traversent nos composants. C'est là qu'est l'importance et la nécessité d'utiliser les lois fondamentales.

Dans le domaine de l'électronique, on peut distinguer le domaine du courant continu et le domaine du courant alternatif (ou plus généralement dit « courant variable »).

Dans le cadre de cette partie, nous ne nous occuperons que des lois relatives au courant continu.



Le courant délivré par une pile est un courant continu.

Le courant délivré par un transformateur est un courant alternatif, mais il existe des transformateurs équipés d'un convertisseur de courant alternatif vers du courant continu. Ces derniers sont repérés par les symboles que voici : 9V  et 9VDC.

## La loi d'Ohm

Il s'agit sans doute de la loi qui a révolutionné le monde de l'électronique et de l'électricité.

C'est la loi qui permet de connaître l'intensité du courant qui traverse une charge (une résistance dans notre cas) soumise à une différence de potentiel (dite tension ou DDP).

Inversement, cette loi permet aussi de connaître la DDP à appliquer à la charge pour qu'elle soit parcourue par une certaine intensité de courant.

Soit les trois paramètres suivants :

- $R$  : la résistance. Son unité est l'ohm, noté  $\Omega$  ;
- $U$  : la différence de potentiel entre les deux bornes de la résistance. Son unité est le volt, noté  $V$  ;
- $I$  : le courant traversant la résistance. Son unité est l'ampère, noté  $A$ .

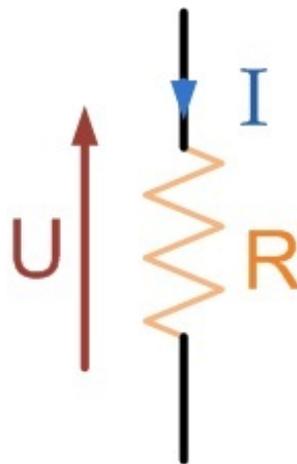


Figure 1 : Une résistance  $R$  traversée par un courant  $I$  et soumise à une DDP  $U$

Ainsi, nous pouvons admettre qu'il existe une relation entre ces trois paramètres, appelée **la loi d'Ohm** :

$$U = R \times I$$

Elle porte également le nom de son inventeur **Georg Simon Ohm**. Et à partir de cette relation, nous pouvons extraire les deux suivantes :  $R = \frac{U}{I}$  et  $I = \frac{U}{R}$



**Vous devez absolument connaître par coeur cette loi**, sans cela vous n'irez pas loin en électronique, mais vraiment pas loin hein ! 😞

## La loi des mailles

Comme nous venons de le voir, les tensions et les courants ont un sens ! C'est une notion très importante et nous allons l'illustrer dans les explications qui suivent.

La loi des mailles est une loi qui permet de mettre en équation les tensions qui se trouvent dans une maille **fermée**.

Dans le cas général, nous allons admettre que  $\sum \text{des tensions dans une maille fermée} = 0$  est ce que l'on appelle la loi des mailles.

Pour ceux qui se demandent ce que représente le symbole  $\sum$  (dit sigma), il s'agit d'une notation mathématique pour dire « somme de ».

Pour commencer, prenons un circuit électrique composé d'un générateur et de deux résistances montées en série :

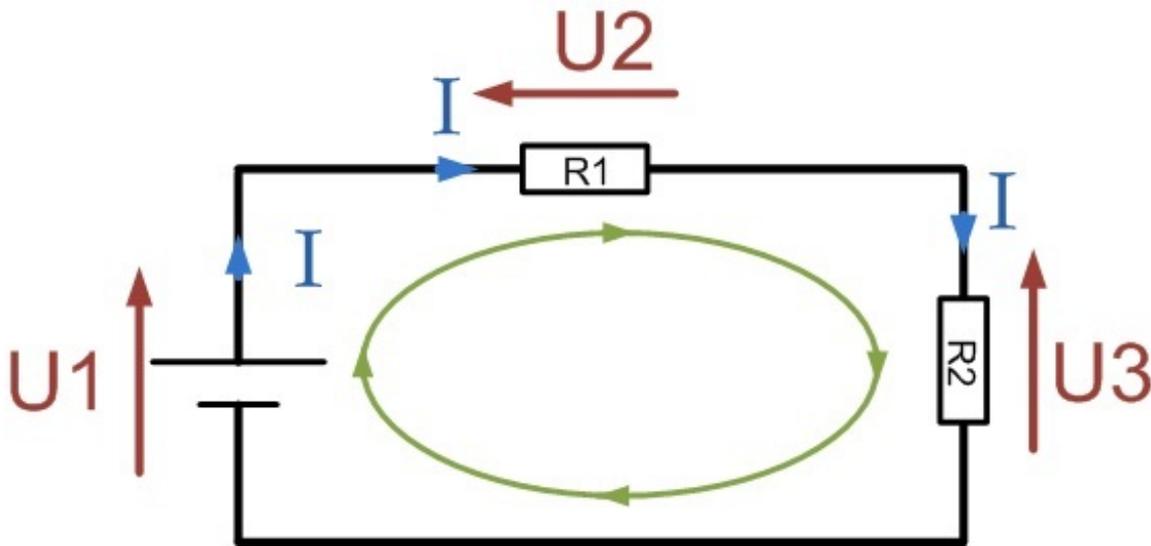


Figure 3 – Un circuit électrique composé d'un générateur et de deux résistances montées en série

Le cercle en vert au milieu représente le sens de parcours que nous allons prendre.

La règle est la suivante :

- on part d'un point quelconque sur le cercle vert, on fait un tour complet pour revenir à ce point ;
- dans notre parcours, les tensions qui ont le même sens que le cercle vert seront notées avec un signe « + » tandis que celles qui s'opposent à ce sens seront notées avec un signe « - » ;
- on effectue la somme de toutes les tensions rencontrées dans notre maille **en respectant les signes** et on dit qu'elle est égale à 0.



#### Une autre manière de procéder

Si vous n'êtes pas à l'aise avec les signes, la loi des mailles peut également être établie suivant la logique :  
*La somme des tensions ayant le même sens que le courant est égale à la somme de celles qui s'y opposent.*

Pour notre petit circuit, voici ce que cela donnerait, étape par étape.

#### Étape 1 – Choix du sens de parcours et du point de départ

On a choisi de parcourir la maille fermée suivant le cercle vert, en partant du point voisin au générateur pour y revenir.

#### Étape 2 – Détermination du signe des tensions

On parcourt ce cercle et on note le signe des tensions :

- $U_1$  est dans le même sens que notre parcours, donc :  $+U_1$  ;
- $U_2$  s'oppose au sens de parcours, donc :  $-U_2$  ;
- $U_3$  s'oppose au sens de parcours, donc :  $-U_3$ .

### Étape 3 – Mise en équation

Ce parcours nous a donné l'équation suivante :  $+U1 - U2 - U3 = 0$ .

En conséquence, nous pouvons dire que  $U1 = U2 + U3$ , ce qui est physiquement logique. On dit que la tension du générateur a été partagée entre les deux résistances (parce qu'elles sont montées en série).



Si on avait choisi de parcourir la maille dans le sens inverse, on aurait eu la même équation (le signe des tensions aurait été inversé mais les deux égalités auraient été équivalentes), autrement dit :

$+U1 - U2 - U3 = 0$  équivaut à dire que  $-U1 + U2 + U3 = 0$



Que peut-on dire du courant I ?

Il s'agit d'un circuit avec une seule branche, en d'autres termes, les résistances sont montées en série, donc le courant qui les parcourt est le même.

Il n'est donc pas intéressant à ce stade d'étudier le courant si ce n'est de dire qu'il est régi par les relations :  $I = \frac{U2}{R1} = \frac{U3}{R2}$  (rappelez-vous de la loi d'Ohm).

Quand il s'agit de montages en parallèle, le courant parcourant les éléments du circuit est partagé mais la tension reste la même. C'est ce que nous allons aborder dans la partie qui suit (la loi des nœuds).

### La loi des nœuds

#### Généralités et énoncé de la loi



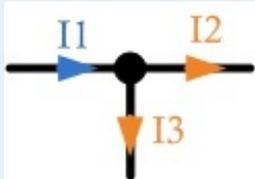
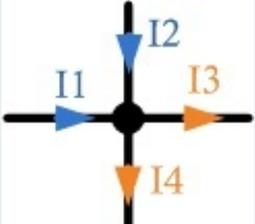
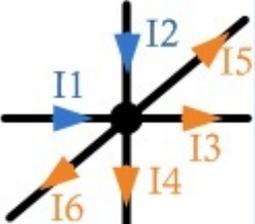
Qu'est-ce qu'un nœud ?

On parle de nœud dans un circuit électrique dès lors que l'on a plusieurs branches. "Plusieurs branches" signifie simplement le fait d'avoir une connexion physique entre trois fils, au moins.

On dit que la somme des courants entrants dans un nœud est égale à la somme des courants sortants de ce nœud :

$\sum \text{courants entrants dans un nœud} = \sum \text{courants sortants du nœud}$ . C'est ce que l'on appelle la loi des nœuds.

Voici quelques exemples :

		
<p>Figure 4.1</p>	<p>Figure 4.2</p>	<p>Figure 4.3</p>
<p>I1 est le seul courant entrant. I2 et I3 sont les courants sortants. Donc on obtient l'équation suivante : <math>I1 = I2 + I3</math></p>	<p>I1 et I2 sont les courants entrants. I3 et I4 sont les courants sortants. Donc on obtient l'équation suivante : <math>I1 + I2 = I3 + I4</math></p>	<p>I1 et I2 sont les courants entrants. I3, I4, I5 et I6 sont les courants sortants. Donc on obtient l'équation suivante : <math>I1 + I2 = I3 + I4 + I5 + I6</math></p>

## Application à un circuit électrique :

Soit le montage de la figure 5 dans lequel on identifie les nœuds A, B, C, et D :

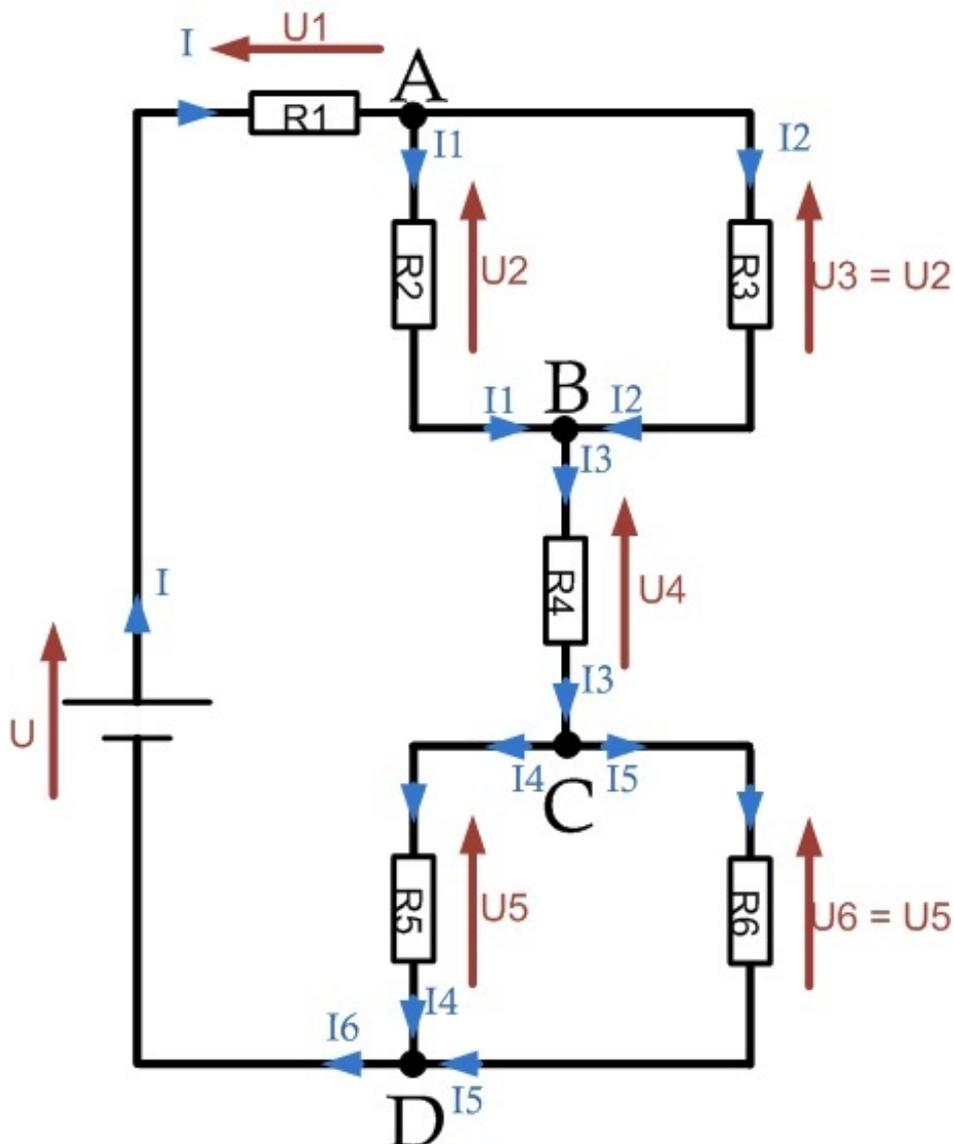


Figure 5 – Circuit électrique avec des nœuds

Si nous suivons le parcours que le courant  $I$  effectue en partant du potentiel « + » du générateur jusqu'à revenir sur le potentiel « - » :

### Nœud A :

Le courant  $I$  se divise pour devenir  $I_1$  et  $I_2$ .

### Nœud B :

Les courants  $I_1$  et  $I_2$  se rejoignent pour former  $I_3$ .

### Nœud C :

Le courant  $I_3$  se divise pour former  $I_4$  et  $I_5$ .

**Nœud D :**

Les courants  $I_4$  et  $I_5$  se rejoignent pour former  $I_6$ .

Je vous invite à un exercice consistant à écrire les équations de courant pour chacun des nœuds A, B, C et D. Voici les résultats :

**Secret (cliquez pour afficher)**

- $A : I = I_1 + I_2$
- $B : I_1 + I_2 = I_3$
- $C : I_3 = I_4 + I_5$
- $D : I_4 + I_5 = I_6$

Je vous fais remarquer que  $I_6$  n'est autre que le courant de départ  $I$  qui a parcouru tout le circuit. Dans son parcours, il a été divisé et reformé plusieurs fois.



Que peut-on dire sur les tensions ?

Si vous avez remarqué, j'ai écrit sur la figure  $U_3 = U_2$  et  $U_6 = U_5$ . Rappelez-vous, il s'agit de résistances montées en parallèle donc le courant est partagé mais la tension reste la même.

Je vous propose d'écrire les différentes équations des tensions présentes sur ce montage sous la forme d'un exercice dont voici les résultats :

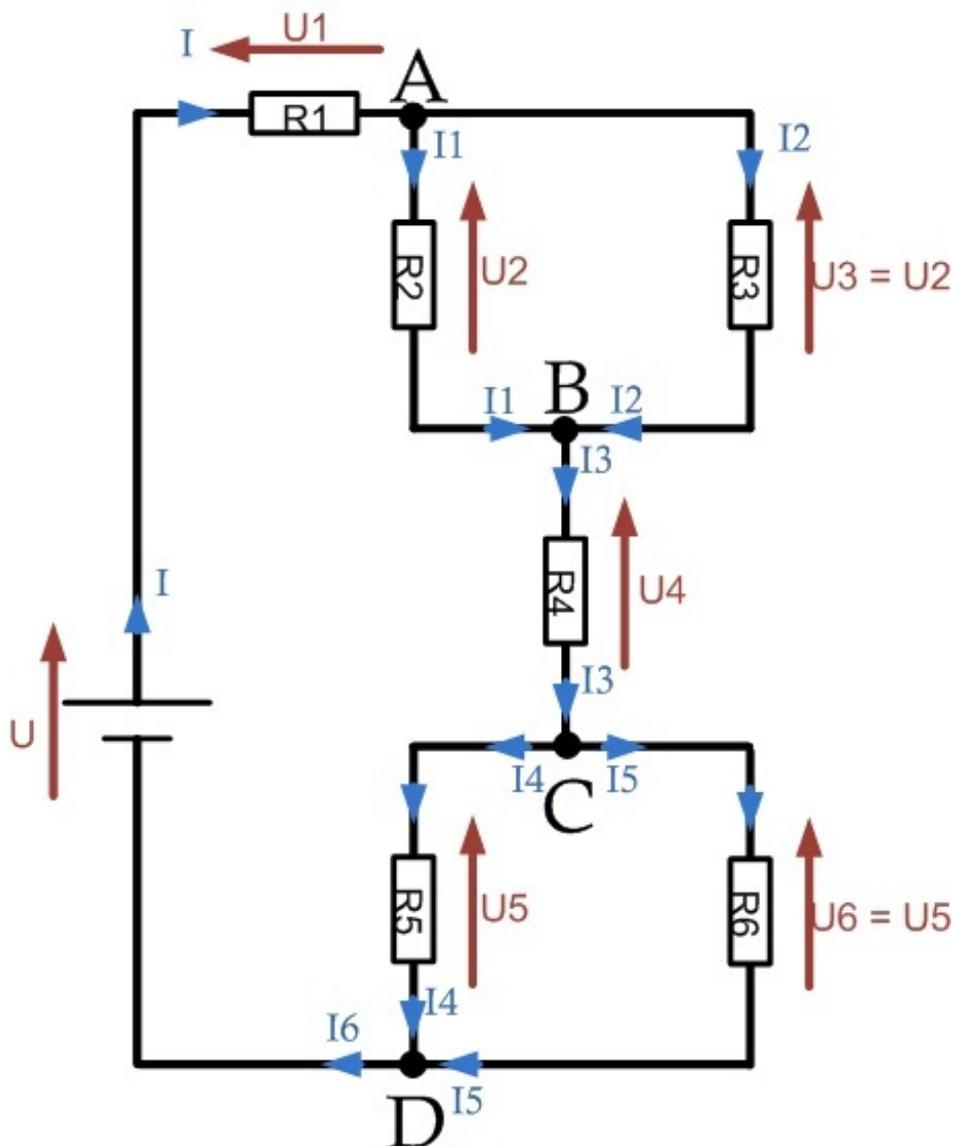
**Secret (cliquez pour afficher)**

- $U - U_1 - U_2 - U_4 - U_5 = 0$  : les mailles R1, R2, R4 et R5 ;
- $U - U_1 - U_3 - U_4 - U_6 = 0$  : les mailles R1, R3, R4 et R6 ;
- $U - U_1 - U_2 - U_4 - U_6 = 0$  : les mailles R1, R2, R4 et R6 ;
- $U - U_1 - U_3 - U_4 - U_5 = 0$  : les mailles R1, R3, R4 et R5.

### Exercice d'application

Afin d'illustrer tout ça, je vous propose de faire un petit exercice.

Soit le montage ci-dessous :



1. Identifier et énumérer les mailles dans ce montage ;
2. Établir les équations de tension pour chacune des mailles ;
3. Montrer que le courant  $I_3$  est égal au courant  $I$ , et que  $I_6$  est égal à  $I_3$  ;
4. Trouver l'expression du courant  $I_3$  en fonction des tensions  $U$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_6$  et de la résistance  $R_4$  ;
5. Trouver l'expression de  $I$  en fonction de  $U_2$ ,  $R_2$  et  $R_3$  seulement ;
6. En déduire que  $R_2$  et  $R_3$  peuvent être vues comme une seule résistance dont la valeur est  $(R_2 * R_3)/(R_2 + R_3)$ .

### Correction

#### Secret (cliquez pour afficher)

1. Identifier et énumérer les mailles dans ce montage  
 Générateur,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$  et  $R_5$  - Générateur,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$  et  $R_6$  - Générateur,  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  et  $R_5$  - Générateur,  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_6$  -  $R_2$  et  $R_3$  -  $R_5$  et  $R_6$ .
2. Établir les équations de tension pour chacune des mailles
 
$$U - U_1 - U_2 - U_4 - U_5 = 0$$

$$U - U_1 - U_2 - U_4 - U_6 = 0$$

$$U - U_1 - U_3 - U_4 - U_5 = 0$$

$$U - U_1 - U_3 - U_4 - U_6 = 0$$

$$U_2 - U_3 = 0$$

$$U_5 - U_6 = 0$$

On peut également écrire :

$$U = U_1 + U_2 + U_4 + U_5$$

$$U = U_1 + U_2 + U_4 + U_6$$

$$U = U_1 + U_3 + U_4 + U_5$$

$$U = U_1 + U_3 + U_4 + U_6$$

$$U_2 = U_3$$

$$U_5 = U_6$$

3. Montrer que le courant  $I_3$  est égal au courant  $I$ , et que  $I_6$  est égal à  $I_3$

D'après la loi des nœuds, au nœud  $A$ ,  $I = I_1 + I_2$ , et au nœud  $B$ ,  $I_1 + I_2 = I_3$  donc on remarque que  $I = I_3 = I_1 + I_2$ .

De la même manière, on démontre que  $I_6 = I_3 = I$  (en appliquant la loi des nœuds aux nœuds  $C$  et  $D$ ).

4. Trouver l'expression du courant  $I_3$  en fonction des tensions  $U$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_6$  et de la résistance  $R_4$

D'après la loi des mailles,  $U_4 = U - U_1 - U_2 - U_6$  or  $I_3 = U_4/R_4$  (la loi d'ohm) donc on remplace  $U_4$  ce qui donne  $I_3 = (U - U_1 - U_2 - U_6)/R_4$ .

5. Trouver l'expression de  $I$  en fonction de  $U_2$ ,  $R_2$  et  $R_3$  seulement

On sait que  $I = I_1 + I_2$  (loi des nœuds) et que  $I_1 = U_2/R_2$  et que  $I_2 = U_3/R_3$ , ce qui donne :

$$I = I_1 + I_2 = (U_2/R_2) + (U_3/R_3) \text{ et sachant que } U_2 = U_3 \text{ alors :}$$

$$I = (U_2/R_2) + (U_2/R_3) \text{ Donc :}$$

$$I = U_2 * (1/R_2 + 1/R_3) \text{ Si on réduit au même dénominateur :}$$

$$I = U_2 * ((R_2 + R_3)/(R_2 * R_3))$$

6. En déduire que  $R_2$  et  $R_3$  peuvent être vues comme une seule résistance dont la valeur est  $(R_2 * R_3)/(R_2 + R_3)$

D'après ce qu'on vient de trouver, à savoir,  $I = U_2 * ((R_2 + R_3)/(R_2 * R_3))$ , on peut écrire quelque chose de la forme  $U_2/I = R$  (loi d'ohm) où  $R$  sera la grandeur  $((R_2 * R_3)/(R_2 + R_3))$ , on dit que cette dernière est une résistance "équivalente" vue entre les nœuds  $A$  et  $B$ .

Ne vous attardez pas sur cette notion de résistance équivalente, car elle sera abordée plus en détail dans le chapitre relatif à la résistance.

S'il y avait des choses à retenir dans cette partie, ce serait :

- $U = R \times I$  : il s'agit de la loi d'Ohm ;
- $\sum \text{des tensions dans une maille fermée} = 0$  : c'est la loi des mailles ;
- $\sum \text{courants entrants dans un nœud} = \sum \text{courants sortants du nœud}$  : c'est la loi des nœuds.

Quelle que soit la complexité d'un circuit électrique, on retrouvera ces notions de base, donc gardez-les à l'esprit et ça facilitera votre apprentissage.

Ces chapitres, longs, fastidieux et peut-être démotivant sont enfin terminé ! Soyez donc rassuré, les chapitres suivant vont enfin rassasier votre soif de connaissance et vous apprendre à utiliser vos premiers composants électroniques. 😊



Un dernier chapitre sur différents théorèmes est en cours de rédaction. 😊

## Partie 2 : [Théorie] Les composants fondamentaux passifs de l'électronique

Nous allons aborder dans cette deuxième partie, les composants fondamentaux de l'électronique. Ce sont, comme la première partie, les bases. Autrement dit, vous devez bien suivre le cours ! Et pour vous aider, je vous ai préparé beaucoup d'exercices qui vous permettront d'appliquer le cours... 



Encore deux autres chapitres sont en cours de rédaction : le condensateur en régime variable et des exercices.

### Les composants électroniques

Vaste programme que les composants électroniques, non ? Ils sont quand même ce qui permet à tout circuit de réaliser ce que l'on attend de lui. 

Néanmoins, avant d'étudier en détail des composants particuliers, il est intéressant d'avoir quelques idées générales sur les composants. Ce chapitre est principalement de la culture électronique et tout n'est pas à retenir. Je vous conseille tout de même de le lire entièrement et avec attention.



Vous lirez dans ce chapitre des noms de composants donnés à titre d'exemple. Si vous n'en avez jamais entendu parler, ce n'est pas grave. Cela viendra dans la suite du cours. Je rappelle que cette partie est essentiellement culturelle.

#### « Que vont-ils bien pouvoir nous raconter ? »

« Bah oui, un composant électronique, c'est un truc avec des pattes que l'on soude, il n'y a rien de plus à dire ! »

Détrompez-vous, il y a matière à raconter sur les composants électroniques !

### Quelques définitions

Commençons par le commencement.

#### *Qu'est-ce qu'un composant ?*

**C'est un élément, qui, assemblé avec d'autres selon un schéma électronique, permet de réaliser une ou plusieurs fonctions électroniques.**

Vous noterez que l'on parle ici d'**assemblage de composants**. En effet, si quelques composants peuvent fonctionner seuls, c'est très rare, et bien souvent, différents composants sont associés pour répondre aux besoins de l'électronicien.

Par ailleurs, les composants sont assemblés selon un **schéma électronique**. Vous pouvez prendre plein de composants et les connecter dans tous les sens, vous aurez peu de chances d'obtenir un circuit électronique qui fasse quoi que ce soit, quoique...



Le schéma électronique indique la manière dont les composants doivent être connectés entre eux et il est important de le respecter, car chaque composant et le sens dans lequel il doit être installé (on parle de **polarité**) ont leur importance. En cas d'erreur, au mieux, votre circuit ne fonctionnera pas ; au pire, vous flamberez quelques composants et vous mettrez en danger !

Enfin, si vous avez bien suivi, une autre question doit vous venir à l'esprit.

#### *Qu'est-ce qu'une fonction électronique ?*

Vous voyez que, finalement, tout n'est pas si simple.

Grosso modo, la fonction électronique est le « pourquoi » d'un objet électronique.

Prenons quelques exemples.

Lorsque vous utilisez un amplificateur audio, la fonction électronique est l'amplification du signal d'entrée. D'accord, c'était facile.

Compliquons légèrement les choses : trouvez-vous que la souris d'un ordinateur est un objet simple ? Pourtant, il remplit de nombreuses fonctions électroniques auxquelles on ne pense pas. En faisant abstraction de la technologie de la souris (à boule, à

infrarouge, à laser, de type trackpad ou que sais-je encore), on peut déjà compter :

- la capture des mouvements longitudinaux de la souris ;
- la capture des mouvements latéraux ;
- la capture des appuis sur les différents boutons (et il faut là distinguer les boutons !) ;
- s'il y a une molette, la capture de ses mouvements ;
- et l'envoi selon un protocole bien défini de toutes ces informations à l'unité centrale.

Et cette description est succincte. Je parie que vous ne regarderez plus votre souris comme avant !

### *Finalemment...*

...vous comprenez à travers ces deux définitions que les composants sont bien plus que des « trucs avec des pattes que l'on soude ».

## **Et ça ressemble à quoi, concrètement ?**

### *Des formes variées*

Il existe des composants électroniques de toute forme et de toute taille : du condensateur haute tension, cylindrique, gros comme une cannette de votre soda favori à la résistance rectangulaire de 0,5 x 1 mm ! Certains sont plats, d'autres creux. D'autres encore émettent de la lumière (LED, écrans LCD, etc.) ou du son (*buzzer*, par exemple). Enfin, beaucoup présentent un marquage permettant de les identifier, de les orienter et de respecter leur polarité.



Figure 1 : composants électroniques variés

Je ne parle pas ici de la couleur des composants. Pour beaucoup, elle dépend du fabricant. Mais pour les résistances en particulier, les couleurs sont importantes. Vous en apprendrez plus à ce sujet dans la suite du cours.

### *L'unijambiste et le mille-pattes*

Ça ressemble à un titre de fable, n'est-ce pas ? Tout cela pour dire que vous pourrez trouver des composants électroniques possédant une patte, deux pattes, trois pattes, etc., jusqu'à... eh bien, théoriquement, autant de pattes que vous le souhaitez !

Pour être tout à fait exact, il faudrait parler de **bornes** d'un composant plutôt que de pattes. Vous trouverez également souvent l'appellation anglaise *pin*. Les bornes de certains composants ont même des petits noms bien à eux ; par exemple, on appelle respectivement les trois bornes du transistor bipolaire, l'émetteur, le collecteur et la base, ou encore les trois bornes du transistor MOS, la source, la grille et le drain. Néanmoins, personne ne vous reprendra jamais si vous parlez de pattes d'un composant et non de bornes.

Dans la pratique, vous utiliserez la plupart du temps des composants possédant entre deux et une vingtaine de pattes. Les plus ~~fo~~ courageux utiliseront des composants possédant jusqu'à une centaine de pattes (et croyez-moi, c'est un plaisir à souder !). Sachez toutefois que les grandes industries électroniques conçoivent et fabriquent des composants



appelés ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) selon leurs propres cahiers des charges, et qu'ils ajustent le nombre de pattes à leurs besoins, jusqu'à plus de deux-mille pattes ! 🤖 Je vous rassure, une machine se charge de souder le bazar !

### Les composants à une patte

Il en existe peu, mais il y en a, sachez-le. Parmi eux, les antennes ou certaines résistances particulières, dites « de puissance ».

On peut aussi qualifier les plots de test, sur lesquels nous allons raccorder une pointe de multimètre ou de composant à une patte. Mais c'est une considération purement pratique : le composant existe concrètement ; mais théoriquement, sur un schéma électronique, c'est un nœud, et il n'y a pas de symbole dédié.

### Les composants à deux pattes : les dipôles

Les dipôles constituent la plus importante famille de composants électroniques, tant par leur variété que par leur présence dans les circuits.

Citons parmi eux notamment :

- les résistances ;
- les condensateurs ;
- les inductances (ou bobines) ;
- les diodes sous (presque) toutes leurs formes ;
- les fusibles.

### Les composants à trois pattes : les tripôles

Ces composants-ci sont aussi très présents, notamment grâce à toute la famille des transistors.

On peut citer par exemple :

- certains régulateurs de tension ;
- les potentiomètres ;
- les diodes Zener programmables ;
- les LED bicolors.



J'ai dit que les dipôles étaient les composants les plus présents. Il convient quand même de préciser que lorsque l'on parle d'un microprocesseur contenant X millions de transistors, le composant est le microprocesseur, pas le transistor. C'est pourquoi on ne considère pas que les plus présents sont les tripôles avec leur composant vedette, le transistor.

### Les composants à quatre pattes

En vrac :

- certains amplificateurs intégrés ;
- les ponts de diodes ;
- certains régulateurs de tension ;
- les optocoupleurs.

### Les composants à plus de quatre pattes

On retrouve là encore certains amplificateurs intégrés, d'autres régulateurs de tension, d'autres optocoupleurs. Mais surtout, à partir de huit pattes, on trouve les **circuits intégrés** qui peuvent remplir seuls une fonction électronique particulière. Leur champ d'application est extrêmement vaste : du simple inverseur logique au plus compliqué des processeurs en passant par les amplificateurs audio multiples ou les circuits programmables.

Il serait impossible d'en faire une liste exhaustive. Les meilleurs magasins d'électronique peuvent vous procurer leur catalogue de quelque mille pages si cela vous intéresse, mais même eux restent incomplets.

## *Les différentes implantations*

Dans un montage électronique, les composants sont reliés entre eux par des soudures (ou des brasures) et des pistes de cuivre sur circuit imprimé. Je pense que la plupart d'entre vous ont déjà vu ces techniques en cours de technologie au collège.

On distingue trois façons de souder les composants, qui dépendent de sa forme (on parle du boîtier) :

- flottante : les composants sont reliés au reste du circuit par des fils ou des nappes de fils. Les composants concernés par cette méthode sont généralement des composants méca-électroniques, c'est-à-dire des composants sur lesquels nous

allons exercer une action mécanique (un interrupteur ou un potentiomètre de réglage du volume sonore, par exemple) ;

- **traversante** : les composants possèdent de longues pattes (oui, oui, des pattes pour de vrai, ce coup-ci !) que l'on passe à travers des trous du circuit imprimé, et que l'on soude directement sur les pistes de cuivre. Sur le dessin du circuit imprimé, on prévoit des **pastilles** à l'endroit de ces trous, c'est-à-dire un élargissement de la piste de cuivre, pour faciliter la soudure ;

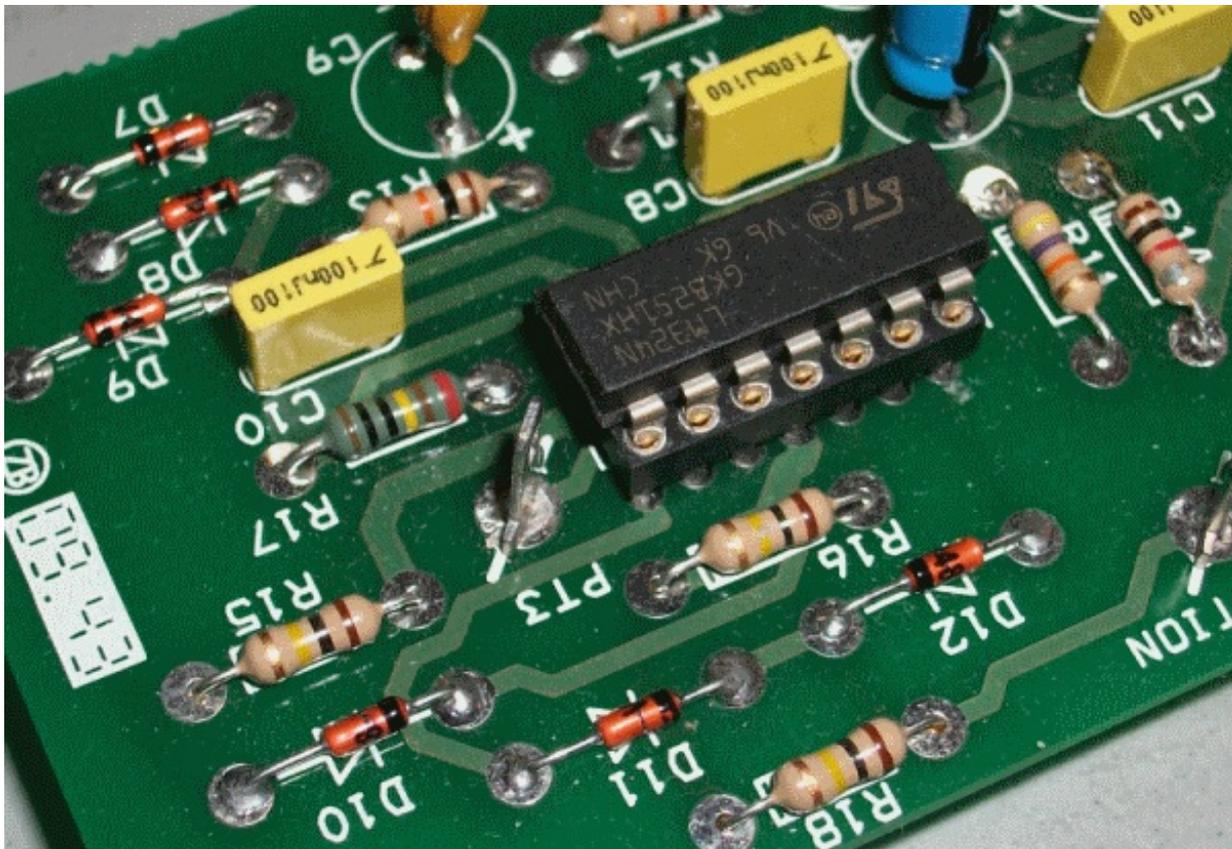


Figure 2 : implantation traversante des composants – ces derniers sont soudés à travers la carte

- **CMS** (Composants Montés en Surface) : il s'agit des composants les plus difficiles à souder, car ce sont les plus petits. La technique consiste à braser les composants d'une carte directement à sa surface ; les surfaces à mettre en contact étant très faibles, la tâche est particulièrement difficile. À part pour de petites séries ou pour un prototype, pour lesquels on peut s'en occuper manuellement, ce sont le plus souvent de grosses machines qui s'en chargent. Si vous ouvrez un appareil électronique aujourd'hui, il est fort probable que n'y voyiez que des composants CMS : ce sont ces minuscules briques disséminées un peu partout ou ces gros carrés avec plein de pattes de moins d'un millimètre de large. Je vous déconseille d'essayer de les dessouder puis de les ressouder. 🤖

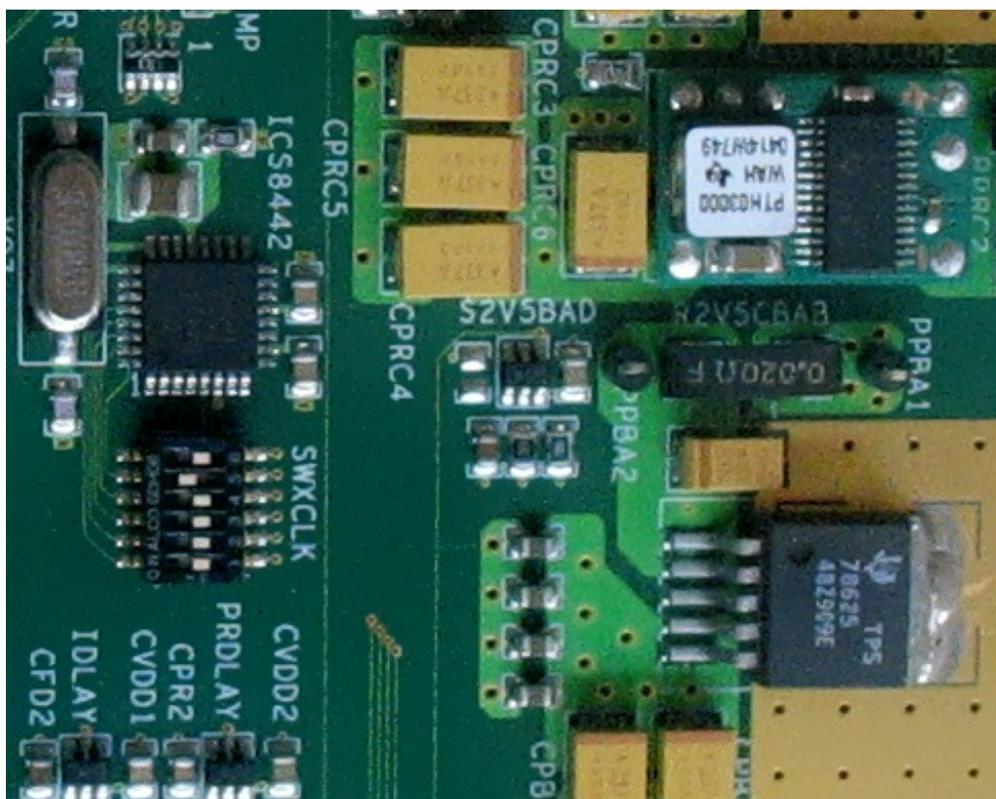


Figure 3 : implantation CMS – les composants sont soudés sur la carte

## C'est fini ?

Je vous avais prévenu, il y en a des choses à raconter. Et tout ceci n'était que des généralités, et restait très superficiel. J'espère ne pas vous avoir assommé. Comme je vous le disais en introduction, cette partie est essentiellement « pour la culture » et ne pas avoir tout retenu ne vous gênera pas pour la suite du cours.

Attaquons à présent des choses un peu plus intéressantes !

## Actifs ou passifs ?

J'en vois déjà certains sourire... Je vous arrête immédiatement : on parle toujours d'électronique et de composants.

Vous l'avez compris, il existe un nombre incalculable de composants électroniques, et il est indispensable de pouvoir les classer. Mais quel classement utiliser ? Les classements alphabétiques, par forme, par couleur et par type d'implantation sont à proscrire, car ils sont soit illogiques, soit sources d'erreurs. Comme on l'a déjà vu dans le chapitre [Électricité - La source d'énergie](#), l'électronique est une question de transfert d'énergie. La première distinction que nous pouvons effectuer entre tous les composants est donc purement physique : ce composant X peut-il ou non fournir de l'énergie ? Est-ce un générateur ou un récepteur ?

Cette distinction n'est toutefois pas satisfaisante, car elle n'est pas assez restrictive. Nous allons alors compléter notre définition : l'idée est, lors de l'analyse d'un circuit, d'ignorer toute source constante de courant ou de tension (et la puissance associée) comme les piles, batteries, accumulateurs, etc., et de ne se concentrer que sur les signaux non-constants.

Prenons l'exemple d'un oscillateur : ce composant reçoit une grandeur continue et la transforme en une grandeur alternative. Pour cela, il consomme bien entendu de l'énergie. En électronique, et pour tout système physique en général, retenez bien qu'**il est impossible de produire plus d'énergie que l'on en reçoit**. Mais en respectant notre définition, l'oscillateur **semble** produire une grandeur alternative *ex nihilo*, il **semble** donc produire de l'énergie.

En utilisant cette technique d'analyse, les électroniciens ont pu distinguer deux grandes catégories de composants.

## Les composants passifs

### Définition

Un composant passif est un composant qui ne peut pas introduire d'énergie dans le circuit auquel il appartient.

Par conséquent, ils sont par exemple **incapables d'amplifier un signal**, c'est-à-dire d'**augmenter sa puissance**. Je précise ce point particulier, car vous verrez dans la suite du cours (dans le chapitre sur les filtres) des montages à base de composants passifs pouvant augmenter la tension ou le courant ; mais dans ces circuits, la puissance est en général diminuée, et au mieux inchangée.

### *Autres définitions moins complètes*

Il existe d'autres définitions de composants passifs, mais celles-ci sont souvent moins précises et moins complètes. Il est intéressant de les connaître car elles sont malgré tout très utilisées.

On trouve notamment :

« Un composant passif est un composant **qui obéit à la loi d'Ohm généralisée**. »

Pour un dipôle, cette loi s'exprime de la façon suivante :

$$U = Z \times I$$

avec  $Z$  l'impédance du dipôle considéré.

Une autre définition, équivalente à la précédente, veut qu'un composant soit passif si son intensité de court-circuit est nulle et si la différence de potentiel à ses bornes est nulle quand le circuit est ouvert, ce qui signifie :  $U = 0 \Rightarrow I = 0$ .

### *Quelques exemples*

Parmi les composants passifs les plus courants, on trouve beaucoup de dipôles, notamment :

- les résistances (variables ou non) ;
- les condensateurs ;
- les bobines ;
- la plupart des diodes.

Si l'on parle de composants passifs, c'est qu'ils existent. 😊

## Des composants actifs

### *Définition*

**Les composants actifs sont des composants capables d'introduire de l'énergie dans le circuit auquel ils appartiennent.**

Ils sont ainsi capables d'amplifier ou de transformer un signal.

### *Quelques exemples*

Parmi les principaux composants actifs, on retrouve les composants d'amplification comme les transistors, les tubes électroniques (ou lampes), les diodes à effet tunnel, etc.

On trouve également dans cette catégorie tous les circuits logiques, les microprocesseurs et microcontrôleurs, les convertisseurs analogique-numérique ou numérique-analogique. Ces composants sont (ou semblent) en effet capables de **produire** un ou des signaux en fonction de certains stimuli.



Comme je l'ai déjà mentionné, lorsque l'on parle d'un microprocesseur de X millions de transistors, le composant est le microprocesseur et non les transistors. Il est bon de comprendre qu'un circuit intégré est en fait un assemblage de composants actifs **et** passifs : en effet, chaque circuit intégré comprend également en interne des résistances et des condensateurs qui servent à limiter le courant dans le circuit, à filtrer certains signaux, à polariser les transistors (vous comprendrez plus loin)... On ne parle pourtant pas d'un composant « mixte » ou « actif-passif » pour le microprocesseur, mais bien d'un composant actif.

## Les composants passifs fondamentaux

Pour terminer ce petit tour d'horizon culturel sur les composants électroniques, je dois maintenant vous parler de ce que l'on appelle les **composants passifs fondamentaux de l'électronique**.

### *Définition*

Les composants passifs fondamentaux de l'électronique sont les composants qui permettent de relier simplement les grandeurs fondamentales de l'électronique entre elles.

D'accord, mais on n'est pas plus avancé. 😊

### *Les grandeurs fondamentales de l'électronique*

Les grandeurs fondamentales de l'électronique sont :

- la tension (ou plus précisément la différence de potentiel) ;
- l'intensité ;
- la charge (il s'agit d'une quantité d'électrons) ;
- le flux magnétique (visible si vous dispersez de la limaille de fer autour d'un aimant).

Mathématiquement, il existe six façons de relier ces grandeurs entre elles de façon simple.

Deux grandeurs sont les variations temporelles d'une autre grandeur :

- la tension est une variation temporelle de flux magnétique :  $d\phi = v \times dt$  ;
- l'intensité est une variation temporelle de charge :  $dq = i \times dt$ .

Les quatre autres relations sont des proportions et les composants fondamentaux de l'électronique vérifient, chacun, une de ces relations.

### *Les composants passifs fondamentaux de l'électronique*

Ces quatre composants sont finalement :

- **la résistance** qui permet de relier tension et intensité, c'est la loi d'Ohm que vous connaissez déjà :  $U = R \times I$  ;
- **le condensateur** qui permet de relier la tension et la charge :  $Q = C \times U$  ;
- **la bobine** qui permet de relier intensité et flux magnétique :  $\phi = L \times I$  ;
- et enfin **le memristor** qui permet de relier flux magnétique et charge :  $\phi = M \times Q$ .

### *Le cas du memristor*

Il y a fort à parier que vous n'avez peu ou pas entendu parler de ce composant. Rassurez-vous, c'est normal !

Le memristor a été théorisé en 1971 par Leon Chua à l'Université de Berkeley en Californie, grâce à un exposé sensiblement similaire à celui que je viens de vous faire : il était perturbé car il n'existait pas de composant répondant aux propriétés mathématiques du memristor alors que c'était pourtant une relation simple. Il s'est alors dit que ce quatrième composant fondamental devait exister (c'est d'ailleurs depuis son premier article que l'on a commencé à parler des composants fondamentaux). Et il a travaillé sur la relation mathématique uniquement, sans aucune réalisation pratique.

Au début des années 2000, une équipe de chercheurs du laboratoire HP a trouvé que les propriétés découvertes par Chua étaient fort intéressantes, et essaie alors de produire le fameux composant. En 2008, c'est mission accomplie.

Peut-être que dans quelques années de mises au point, vous en entendrez plus parler, car ce composant apporte de grands espoirs pour les mémoires et pour les recherches sur l'intelligence artificielle.

Vous trouverez plus de détails en annexe.

## **Introduction aux régimes**

Avant de passer au chapitre suivant, je vais aborder des notions fondamentales que nous utiliserons tout au long du cours. Précisément, lorsque vous aurez compris ce que je m'appête à vous expliquer, vous aurez alors acquis de bonnes bases pour bien comprendre le cours et distinguer les différents fonctionnements des composants électroniques.

## **La notion de régime**



Tu prévois de nous faire perdre des kilos ? 😊

Que d'innocence dans ce regard...

Non, simplement un **régime**, en électronique, est une condition de fonctionnement d'un montage électronique. Afin d'étudier un circuit, on se doit de connaître son régime de fonctionnement. Parfois, un montage électronique allie plusieurs régimes et devient un peu plus difficile à étudier. On verra qu'un montage peut fonctionner avec plusieurs régimes (sinusoïdal, continu, variable, etc.).

## Les différents régimes

### Continu

Commençons par un régime très simple, en fait le plus simple qu'il soit. Le **régime continu** est celui que l'on a étudié jusqu'à maintenant. Alors, vous allez me dire qu'on a encore rien étudié pour l'instant, je le conçois bien, mais je vous ai enseigné des formules et des propriétés qui ne sont applicables qu'en régime continu pour certaines.

Par exemple, la loi des mailles et la loi des nœuds que l'on a vu dans [ce chapitre](#) (je vous invite à les relire si vous ne vous sentez pas à l'aise avec 🤔), ne s'appliquent qu'à des montages fonctionnant en régime continu. Cela dit, on trouvera des raisons de l'utiliser dans d'autres régimes, mais patientons encore un peu...



Mais qu'est-ce qui caractérise le régime continu par rapport à un autre ?

Eh bien, il s'agit du fait que les grandeurs physiques appliquées au montage (tension et courant) ne varient pas au cours du temps. Ce régime est donc stable et son étude est facilitée.

Bien entendu, je ne dis pas que les tensions et les courants ne changent pas de valeurs, non. Seulement, pour avoir un régime continu, le générateur alimentant le montage doit fournir une tension continue ou un courant continu. Mais ce n'est pas tout ! Il se peut très bien qu'une partie du montage, je le disais, fonctionne dans un régime différent. On reviendra sur ce point plus tard.

### Variable

Le **régime variable** est en fait un régime qui en englobe plusieurs, oui car il existe plusieurs type de variations et on les a vues dans [ce chapitre](#).

En régime variable, les grandeurs physiques telles que la tension et le courant changent de valeur au cours du temps. Il peut s'agir de signaux périodiques, fournis par un générateur, ou variables, fournis par une source externe ou une partie du montage.

### Sinusoïdal

Le **régime sinusoïdal** est un peu particulier, nous allons le voir. Le montage fonctionne avec un générateur sinusoïdale ou reçoit un signal de ce type.

## Notre régime de travail

### Le signal sinusoïdal

On l'appelle ainsi car tout simplement la tension a une forme de la **fonction mathématique sinus**. Et cela lui donne plusieurs propriétés et caractéristiques intéressantes par rapport à d'autres formes de signaux (carrée ou triangulaire, par exemple) pour une raison que je vous expliquerai bientôt.

Voici une image de la fonction mathématique sinus :

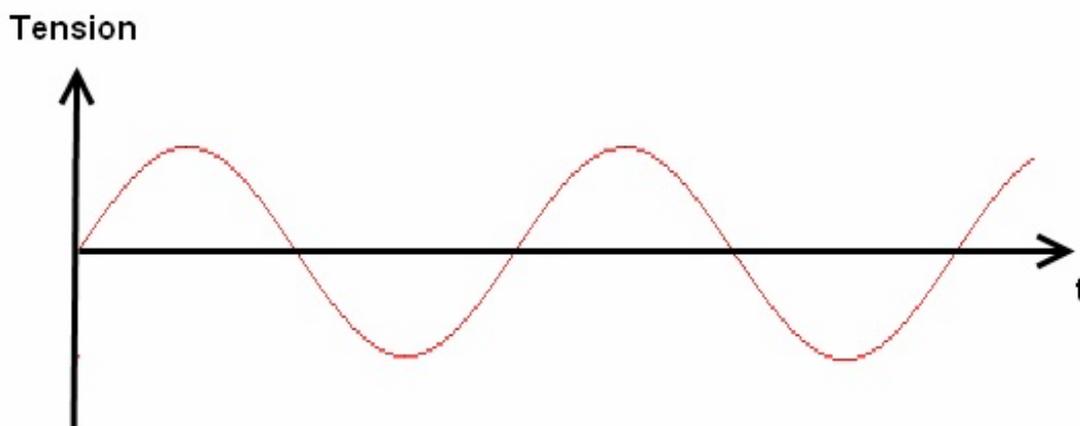


Figure 4 : Signal sinusoïdal, "parfaite" illustration de la fonction mathématique sinus



Mathématiquement, cette fonction varie entre 1 et -1. Essayez donc de faire des calcul de sinus avec votre calculatrice, le résultat ne dépassera jamais ces valeurs extrêmes.

En électronique une tension sinusoïdale est caractérisée par son amplitude et sa période.

Cette période est l'image de la fréquence ; plus la période est petite plus la fréquence est élevée et inversement. De cette énonciation, on déduit la formule suivante :

$$f = \frac{1}{T}$$

Avec :

- $f$  : fréquence du signal, en Hertz (Hz)
- $T$  : période du signal, en secondes (s)

Jusque là tout le monde suit, n'est-ce pas ?



Oui, mais pourquoi on va travailler avec le régime sinusoïdal et pas avec le régime continu ou avec des signaux carré ou triangulaire ?

Pour deux raisons :

- la première, c'est que pour aborder les composants passifs fondamentaux, il faut impérativement utiliser le régime sinusoïdale. Surtout dans le cas de la bobine qui n'est utile qu'avec ce régime (ou un autre, mais pas le continu)
- la deuxième, on la voit tout de suite...

### Propriétés des signaux

D'après le grand mathématicien [Fourier](#), n'importe quelle signal périodique peut être vu comme étant [une somme d'un certain nombre de signaux sinusoïdaux](#) à différentes fréquences et amplitudes. On en conclut qu'un signal sinusoïdal est quelque part la brique "de base" qui construit les autres signaux.

L'image extraite de la page Wikipédia précédemment mise en lien, nous montre qu'à partir d'une somme de signaux sinusoïdaux, on recrée un signal de la forme souhaitée :

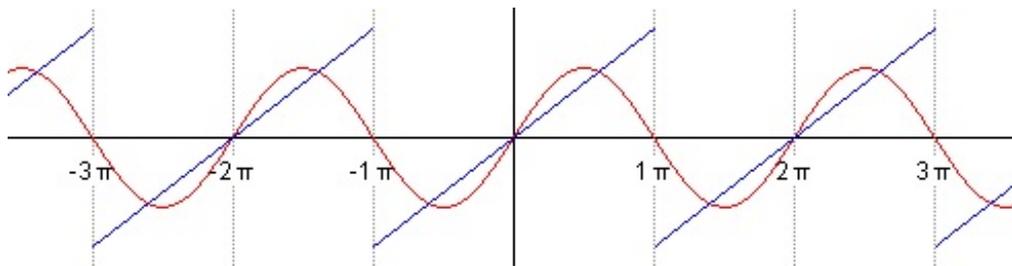


Figure 5 : construction d'un signal en dent-de-scie à partir d'une somme de signaux sinusoïdaux - A noter que l'on ne somme que 5 signaux sinusoïdaux ici



Si on continu à sommer ces différents signaux sinusoïdaux entre eux, on retrouvera le signal de référence (en bleu). Seulement, il faut en additionner pas moins d'une infinité !

## Le spectre d'un signal

Enfin, dernière notion importante qui répond à la question de "pourquoi un signal sinusoïdal et pas un autre ?" : le **spectre d'un signal**.

Le spectre d'un signal, ou plutôt le **spectre fréquentiel d'un signal** est la représentation du signal en fonction de la fréquence. Je vous invite à relire [cette partie](#) concernant les propriétés d'un signal (fréquence, amplitude, etc.).

### Spectre d'un signal carré

Pour prendre un exemple, un signal carré est une somme de signaux sinusoïdaux, certes. Cependant si j'apporte plus de précision et que je vous dis que ces signaux sont à des fréquences différentes, ça change tout ! Oui, je ne l'ai pas précisé jusqu'à présent mais : **un signal différent d'une sinusoïde (carré, triangle, etc.) est composé d'une somme de signaux sinusoïdaux à fréquences différentes.**

Chaque sinusoïde qui compose un signal est appelée : **harmonique**.

Autrement dit, un signal non sinusoïdal est fabriqué à partir de plusieurs harmoniques qui ont toutes une fréquence différente.

Pour en revenir à nos moutons, voilà la représentation spectrale d'un signal carré :

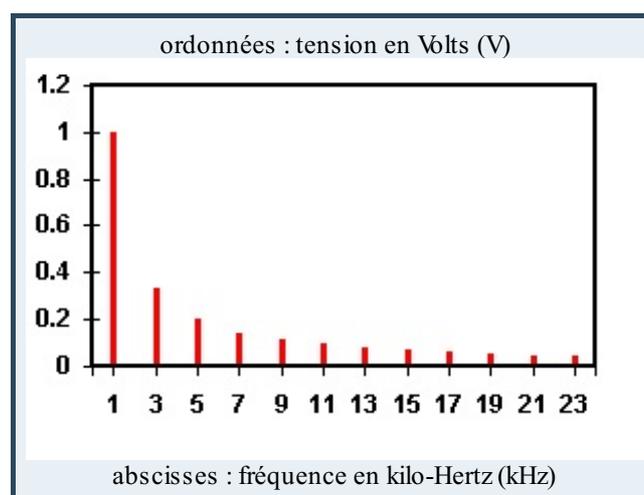


Figure 6 : représentation spectrale d'un signal carré - chaque trait rouge, appelé **raie** est une harmonique du signal



Oula ! T'as bu quoi quand t'as fait ce chronogramme ? C'est de l'art moderne que tu nous as fait ? 😊

Déroutant, n'est-ce pas ? Je vais vous expliquer un peu la procédure de réalisation d'un tel chronogramme.

Je l'ai dit, chaque signal non sinusoïdal pur est formé par une somme de signaux sinusoïdaux. Chaque signal sinusoïdal, ou **harmonique**, qui compose le signal carré a sa propre fréquence et sa propre amplitude. Sur le chronogramme du spectre du signal carré (et les autres en général) on note la tension de l'amplitude du signal en fonction de la fréquence de chaque harmonique. Ainsi, sur ce chronogramme on peut lire qu'il y a une harmonique ayant une fréquence de 1kHz et une amplitude de 1V. Une autre de fréquence 5kHz et d'amplitude 0.2V, etc.

Mais quelques explications s'imposent :

- La première harmonique (qui se trouve tout à gauche), est dite **de rang 1**. On l'appelle également **le fondamental**. C'est, disons, la fondation de base du signal. Donc un signal de fréquence 20kHz aura un fondamental de 20kHz.
- Chaque harmonique qui suit l'harmonique de rang 1 est TOUJOURS de plus faible amplitude que l'harmonique qu'il précède. Ces harmoniques vont jouer un rôle crucial car ce sont elles qui vont "déformer" le signal de base (harmonique de rang 1) pour donner la forme finale du signal.
- Chaque harmonique de **rang n** a une fréquence qui est de **n** fois la fréquence de l'harmonique de rang 1. Dans notre exemple, l'harmonique de rang 5 a une fréquence de 5 fois celle du fondamental.
- La somme des amplitudes de chaque harmonique exceptée celle de rang 1 vaut l'amplitude de l'harmonique de rang 1.



Pourquoi il n'y a pas d'harmoniques du signal carré à des fréquences comme 2kHz ou 4kHz ?

Bien vu ! C'est une propriété du signal carré : il ne possède pas d'**harmonique de rang paire** (pour 0, 2, 4, 6, ...) et n'a que des **harmoniques de rang impaire** (pour 1, 3, 5, 7, ...).

Il existe aussi des signaux qui ne possèdent que des harmoniques de rang paire et d'autres possèdent les deux.

### *Spectre d'un signal sinusoïdal*



Et qu'en est-il du signal sinusoïdal ?

C'est là que je voulais en venir ! **Un signal sinusoïdal, étant la base de fabrication d'un signal quelconque, ne possède qu'une seule harmonique !** En effet, il ne peut pas être composé d'autres signaux sinusoïdaux, sinon ce n'en est plus un.

En découle le spectre-ci :

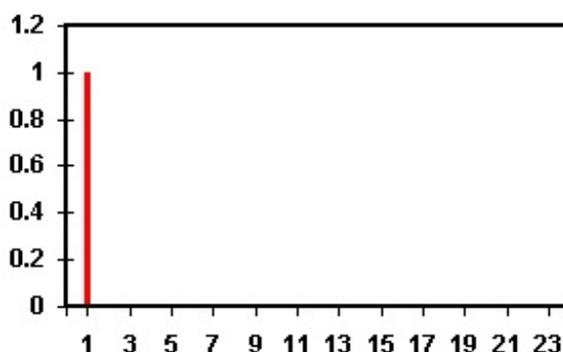


Figure 7 : Spectre fréquentiel d'un signal sinusoïdal

Ainsi, lorsque l'on fera l'étude des composants en régime sinusoïdal, ce sera beaucoup plus facile qu'avec des signaux carré ou triangulaire, car il n'y aura pas à se soucier de plusieurs harmoniques.



Si ce point reste un peu flou à vos yeux, ne vous inquiétez pas, c'est normal. Tout à fait, car ce sont des notions assez avancées qui n'ont pas vraiment leur place présentement, mais qui sont essentielles pour poursuivre le cours. Vous aurez l'occasion de mieux comprendre ces notions plus loin dans le cours. 😊

### Valeur moyenne : représentation sur le spectre

La valeur moyenne, rappelons-le est la tension moyenne d'un signal. On parle en fait d'offset. Eh bien, l'offset d'un signal se caractérise par une raie, sur le chronogramme spectral, à la fréquence 0Hz. Oui, une tension continue (offset) est une tension sinusoïdale de fréquence nulle. On la représente donc ainsi :

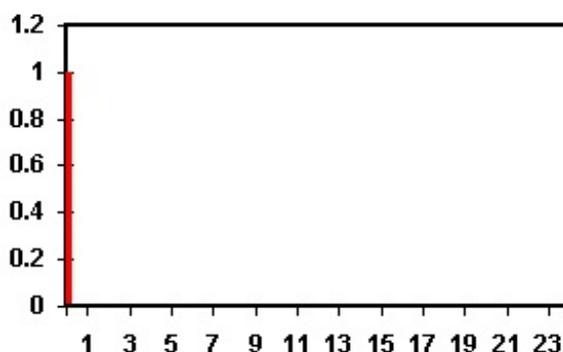


Figure 8 : spectre fréquentiel d'un signal continu ou de l'offset d'un signal

## Les propriétés du signal sinusoïdal

Encore un dernier point que nous devons absolument traité : les propriétés d'un signal sinusoïdal. Ce sera très court et pas moins important !

### La valeur efficace



Qu'est-ce que c'est ?

La valeur efficace d'un signal sinusoïdal est en fait une valeur qui résulte d'un calcul un peu particulier : on doit diviser la valeur maximal du signal par la racine carré de 2 :

$$U_{\text{efficace}} = \frac{U_{\text{MAX}}}{\sqrt{2}}$$

Par exemple, sur le secteur électrique (en France), la tension que l'on mesure est de environ 235V alternatifs. Eh bien si vous voulez connaître la tension maximale de ce signal (qui rappelons-le est sinusoïdal), il suffit de multiplier cette valeur efficace par la racine de 2 :

$$U_{\text{MAX}_{\text{secteur}}} = U_{\text{efficace}} \times \sqrt{2}$$

$$U_{\text{MAX}_{\text{secteur}}} = 235 \times \sqrt{2}$$

$$U_{\text{MAX}_{\text{secteur}}} \approx 332V$$

Voilà pour l'exemple.

### Valeur moyenne

La **valeur moyenne** d'un signal alternatif sinusoïdal sans offset est nulle.



Notez que je parle en tension, mais que le signal pourrait très bien être de type courant. On remplacera donc les tensions par des courants.

Après ce petit prélude aussi instructif que passionnant je l'espère, entrons dans le vif du sujet.

Abordons d'ailleurs tout de suite plus en détail les propriétés des composants passifs fondamentaux de l'électronique (sauf du memristor).

## Résistance et résistor

Le résistor est le premier composant que nous allons aborder car il est indispensable en électronique ! Il nous offre la possibilité d'interagir avec le courant et la tension, bien que sa nature soit de réduire l'intensité du courant. Mais ça, je vous laisse le découvrir...

### Débutons simplement...

Imaginons un montage très simple, qui se compose de deux éléments, un générateur de tension (je le rappelle : il génère une tension constante quelque soit le courant à fournir) et une ampoule par exemple. Il circule dans ce montage un courant électrique. Ce courant a une intensité qui lui est propre et qui est définie par la loi d'ohm.

Ce que nous allons voir dans ce chapitre va nous permettre de modifier l'intensité du courant dans ce montage. Notre but sera de modifier l'intensité lumineuse de l'ampoule.

Pour procéder à une telle expérience, il existe un composant qui, vous vous doutez bien, est le résistor !

## La résistance

Avant de rentrer dans le vif du sujet, on va avant tout définir le terme de "résistance" car il a plusieurs significations possibles.

### Qu'est-ce que la résistance ?

- C'est la propriété physique dont dispose un conducteur pour s'opposer au passage du courant;
- C'est également un composant électronique qui vérifie la loi d'ohm. Il ressemble au composant à droite, en gros plan;
- Enfin, c'est un modèle mathématique qui permet de calculer la résistance d'un *conducteur ohmique*.



Pour nous y retrouver dans tout cela, le terme "résistance" sera employé pour parler de la propriété physique. En revanche, nous utiliserons le terme "résistor" pour parler du composant électronique.

Nous avons vu que les isolants s'opposent au passage du courant et que les conducteurs laissent passer le courant sans opposition. Or, nous n'avons pas vu qu'il existe des conducteurs qui s'opposent au passage du courant. Et c'est justement l'objet de ce chapitre. Ce que nous allons étudier est un **mauvais conducteur**.

### Déterminer la résistance d'un fil

Un fil électrique, aussi bon conducteur soit-il, possède une résistance qui s'oppose donc au passage du courant. Eh bien, il existe une formule qui permet de calculer la résistance d'un conducteur, en l'occurrence un fil électrique. Cependant pour que la formule s'applique correctement les conditions de tests doivent être données car la résistance d'un fil conducteur dépend aussi de la température de l'air ambiant. Mais ce n'est pas tout ! Il faut également que le conducteur soit un fil dont l'homogénéité de sa matière constituante soit parfaite (il ne doit pas contenir d'impuretés, ce qui est très difficile à obtenir). Sans plus attendre, voici cette formule :

$$R = \rho * \frac{l}{s}$$

Avec :

- $R$  : résistance du fil en ohm ( $\Omega$ )
- $\rho$  : (rhô) résistance en ohm par mètres, paramètre différent selon le matériau du conducteur et sa qualité ( $\Omega * m$ )
- $l$  : longueur en mètres du fil ( $m$ )
- $s$  : section du fil en mètre carré ( $m^2$ )

Malheureusement, la résistance qu'offre un bon conducteur électrique est très faible et ne suffira pas pour que l'on observe une différence de luminosité avec notre ampoule.

### Application

Appliquons cette formule pour prouver que ce que je dis est vrai. 😊

Pour un fil conducteur de cuivre dont la constitution est dénuée de toute impureté, de diamètre 1mm et de longueur 1m, ayant une résistance par mètre de  $17n\Omega.m$  voici le calcul à effectuer :

$$R = \rho * \frac{l}{s}$$

$$R = 17.10^{-9} * \frac{1}{0,000001}$$

$$R = 0,017\Omega$$

Notre fil a donc une résistance de  $0,017\Omega$ . Voyez que ce que je disais est vrai et heureusement car un bon conducteur est censé conduire et ne pas s'opposer au passage du courant, même si ce n'est pas réellement le cas dans la réalité.

Cette résistance, *à priori* très faible, est très gênante pour la communication par réseau électrique (téléphone, internet, ...). Pour vous le prouver, là encore, voici un petit calcul tout simple : multiplier le résultat précédent par 1000 pour trouver la résistance de notre fil si ce dernier mesurait 1km :

$$R = 0,017 * 1000$$

$$R = 17\Omega$$

Voyez que la résistance augmente considérablement avec la taille du fil. Pour vous donner une meilleure approche de cette valeur, sachez que pour une tension de 10V aux bornes de notre fil de 1m, on aurait un passage du courant avec une intensité d'environ 588A, alors que pour notre fil de 1km à la même tension à ses bornes, l'intensité du courant ne serait plus que de 0,294A. Il y a une sacrée différence tout de même ! Et pas des moindres, car sur le réseau téléphonique (par là où passent le téléphone, l'ADSL, internet, etc.) la vitesse de l'information est considérablement réduite. Et c'est pour cette raison que les FAI se lancent dans la course à la fibre optique.



C'est pour cela qu'en audio, lorsque l'on choisit d'acheter du câble (par exemple pour relier des enceintes à un amplificateur) le meilleur choix à faire est d'utiliser un câble dont la résistance au mètre est la plus faible possible.

Voilà un petit tableau qui vous donne la résistance au mètre, pour un fil homogène de  $1mm^2$ , de quelques métaux et le coefficient de température :

Métal	Résistance en $\Omega.mm^2/m$	Coefficient de température en $\Omega/^{\circ}C$
Argent	0,0146	+0,004
Cuivre	0,0179	+0,004
Or	0,0244	+0,0037
Aluminium	0,029	+0,004
Fer	0,139	+0,004

Pour le carbone :

Matière	Résistance en $\Omega.mm^2/m$	Coefficient de température en $\Omega/^{\circ}C$
Carbone	35	compris entre $-25.10^{-6}$ et $-200.10^{-6}$

Pour en revenir à notre application, il faut trouver quelque chose de mieux adapté pour faire varier la luminosité de notre

ampoule.

## Le résistor

Évidemment, employer la résistance d'un fil n'est pas pratique dans le cas où l'on souhaite freiner le courant. Il serait en effet idiot d'agir ainsi en alimentant une lampe trop puissante sur la dynamo du vélo de votre grand-mère et de se trimbaler avec 4km de câble entre les deux! 😞

Il faut alors employer les grands moyens pour éviter ce genre de situation et acheter un résistor adéquat, au prix modique d'à peine 10 centimes! 😊

### Qu'est-ce qu'un résistor ?

Le résistor est, pourrait-on dire, une petite boîte renfermant des matériaux dont une des propriétés est de présenter une opposition face au passage d'un courant. C'est donc un mauvais conducteur.

Diantre ! C'est ce qu'il nous faut pour remplacer les 4km de câble sur le vélo de grand-mère! 😄

Pour rappel, chaque composant peut être décrit selon trois critères :

- Passif/actif : le composant amplifie-t-il ou non un signal ? (notion abordée au chapitre trois, les récepteurs);
- Linéaire/non linéaire : le composant déforme-t-il le signal ? (notion abordée au chapitre trois, les récepteurs);
- Symétrique/Non symétrique : le composant possède-t-il, ou non, une polarité ("plus" ou "moins") ?

Le résistor est un composant électronique passif, linéaire et symétrique. C'est un composant à deux broches, c'est donc un dipôle. Voilà une belle photo d'un résistor, taille non-réelle :



Figure 1 : résistor de type carbone

### Fonctionnement interne d'un résistor

Analysons le fonctionnement d'un résistor de type carbone, très employé :

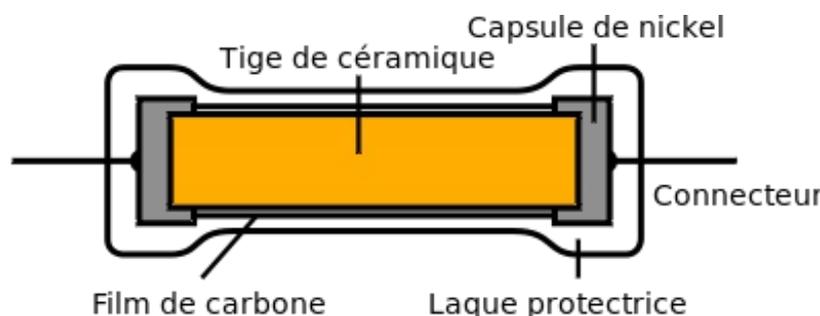


Figure 2 : résistor de type carbone ; composition interne

Image issue de Wikipédia

Voilà donc la constitution interne d'un résistor de type carbone. Il est composé d'un cylindre en céramique qui est recouvert par un film en carbone et est soudé à ses extrémités par une capsule de nickel.



Cela peut paraître surprenant pour certains, car la couche de céramique est plus importante que celle en carbone. En effet, la céramique est un isolant thermique et électrique et va, par le fait, empêcher la surchauffe interne de la résistance



lors du passage d'un courant électrique. Le but est de dégager la chaleur produite vers l'extérieur.

Ce qui va faire office de résistance, c'est la couche carbone, présente autour de la céramique. Plus la quantité de carbone sera élevée, plus la résistance sera faible, et inversement.

### *Symbole*

Selon la norme utilisée, le résistor dispose de deux symboles :



Nous utiliserons que son symbole Européen pour des raisons de compréhension, car il est facile de confondre son symbole Américain avec celui de la bobine.

### *Loi associée*

Le résistor, qui n'est en fait qu'une "résistance dans une petite boîte", a la faculté de reproduire exactement la loi d'ohm. C'est pourquoi, aux bornes d'un résistor, on peut utiliser la loi d'ohm :

$$U = R * I$$

On en a déjà parlé, mais je la réexplique quand même pour les étourdis :

- $U$  : la tension en Volts (  $V$  )
- $I$  : l'intensité du courant en Ampères (  $A$  )
- $R$  : la résistance en ohms (  $\Omega$  )



Je rappelle qu'il est impératif de connaître la loi d'ohm par cœur ! Vous ne pouvez pas continuer l'électronique sans ce bagage, assez mince tout de même.

L'unité du résistor est donc le ohm ( $\Omega$ ). Sa caractéristique reproduit celle d'une droite croissante :

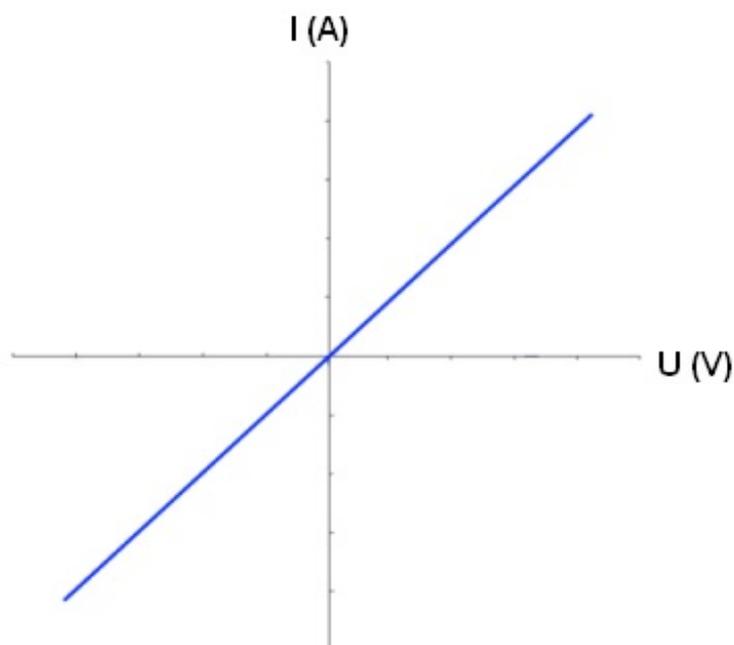


Figure 3 : Courbe caractéristique tension/courant d'un résistor - la loi d'ohm induit une proportionnalité

### Ordre de grandeur

En électronique (celle que l'on fait nous) nous aurons l'occasion de manipuler des résistors dont la valeur résistive est comprise entre environ  $1\Omega$  et  $10M\Omega$  :

Ordres de grandeur du Ohm

Nom	Symbole	Puissance de 10	Commentaires
mega Ohm	$M\Omega$	$10^6$	Assez utilisé
kilo Ohm	$k\Omega$	$10^3$	Très utilisé
Ohm	$\Omega$	$10^0$	Très utilisé
milli Ohm	$m\Omega$	$10^{-3}$	Quasiment jamais utilisé

## La pratique

### Utiliser un résistor

L'utilisation d'un résistor relève de la simplicité extrême mais dépend de plusieurs paramètres à prendre en compte. Je vais vous les présenter dans ce paragraphe.

#### Branchement

Le premier point indispensable est de savoir comment se branche un résistor. Nous avons vu que le résistor est un composant symétrique et n'a pas de sens spécifique et l'on peut ainsi brancher indifféremment un résistor dans un sens ou dans l'autre.

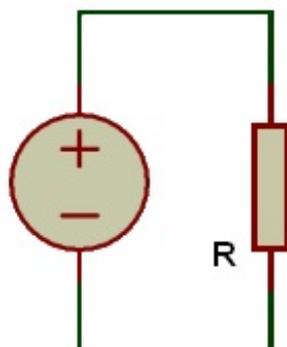


Figure 4 : résistor aux bornes d'un générateur

C'est un exemple qui montre une connexion possible du résistor. Cependant, ce montage ne sert pas à grand si ce n'est qu'à démontrer la loi d'ohm. Revenons-en plutôt à notre ampoule. Voilà une petite suite d'images qui vous montre les différences de luminosité en fonction de la valeur de la résistance du résistor :

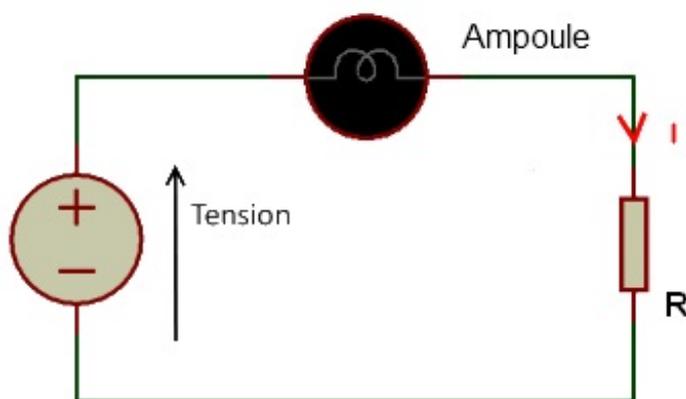


Figure 5 : résistor à valeur résistive élevée

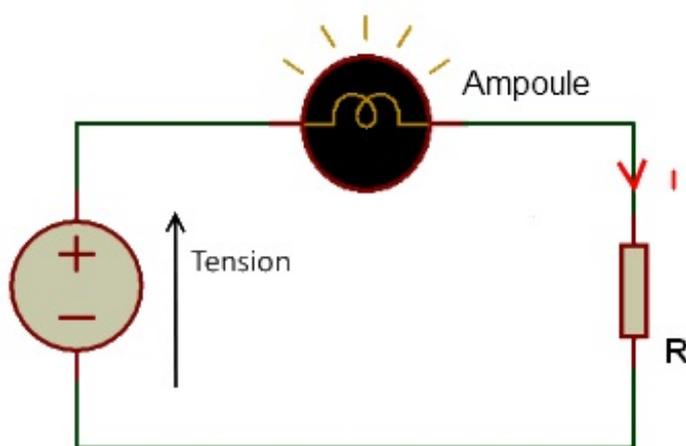


Figure 6 : résistor à valeur résistive moyenne

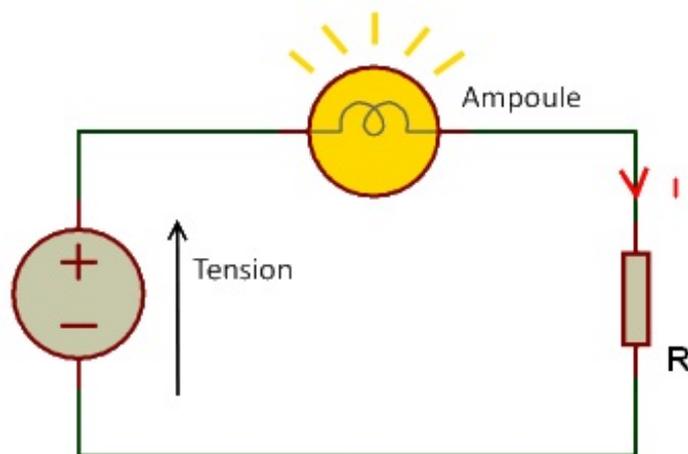


Figure 7 : résistor à valeur résistive faible

Vous voyez bien que plus la valeur de la résistance du résistor est grande, plus le courant a de difficultés pour le traverser et à allumer l'ampoule correctement. En revanche, plus on se rapproche d'une faible résistance, plus l'ampoule s'éclaire. Le tout est dû à la loi d'ohm.



Quand je dit que la valeur résistive est élevée, je me base par rapport au courant nécessaire pour allumer l'ampoule.

### Puissance

Un résistor qui est traversé par un courant doit pouvoir supporter une certaine puissance. En effet, la relation :  $P = U * I$  entraîne un échauffement thermique du résistor. Il doit donc être capable de dissiper la chaleur. Et nous l'avons vu pour le résistor carbone, sa constitution interne est prévue à cet effet.

Par exemple, un résistor alimenté sous une tension de 30V et un courant de 0,05A, la formule  $P = U * I$  nous donne la puissance qui doit être dégagée par le résistor. Si on veut qu'il subisse le moins de dommages possibles, il est recommandé de choisir en conséquence la puissance maximale que peut supporter le résistor. Pour cela, il suffit de calculer la puissance qu'il doit dissiper :

$$P = U * I$$

$$P = 30 * 0,05$$

$$P = 1,5W$$

Le résistor doit donc pouvoir supporter une puissance de 1,5W.

Selon la technologie utilisée pour un résistor, sa puissance maximum supportée sera différente :

Technologie	Puissance maximum
Carbone	0,5W / 250V
Carbone à couche métallique	0,4 à 0,6W / 200 à 350V
Carbone à couche métallique (résistance de précision)	0,5 à 1W / 1,6 à 10 KV
Céramique	1 à 300W / 350V
Bobinées	1 W à 20 W / Tension max déterminé par puissance max

Tableau à titre indicatif

## Exercices

Soit le montage suivant sur lequel je vais vous poser des questions dans les prochains exercices :

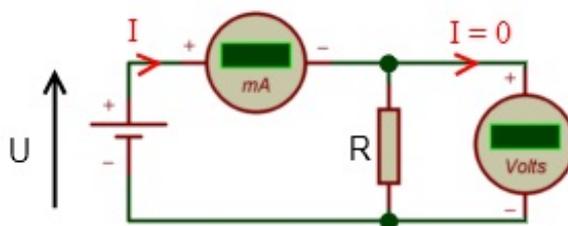


Figure 8 : résistor connecté à un générateur de tension continu

### Exercice 1

Donnez-moi l'expression de la résistance du résistor  $R$ .

Secret (cliquez pour afficher)

Solution :

D'après la loi d'ohm, on a :

$$U = R * I$$

Donc, grâce au "produit en croix", on obtient :

$$R = \frac{U}{I}$$

On va maintenant pouvoir calculer  $R$  avec cette formule.

### Exercice 2

Sur le schéma, j'ai placé un milli-ampèremètre et un Voltmètre. Sachant que le milli-ampèremètre peut être remplacé par un fil et le voltmètre par un interrupteur : calculez l'intensité  $I$  avec  $U = 25V$  et  $R = 560\Omega$ .

Secret (cliquez pour afficher)

Réponse :

Toujours d'après la loi d'ohm et avec notre "produit en croix", on trouve :

$$I = \frac{U}{R}$$

Soit :

$$I = \frac{25}{560}$$

$$I = 44,64mA$$

Le courant qui traverse le résistor est donc de  $I = 44,64mA$ .

### Exercice 3

Avec les mêmes valeurs que précédemment, calculez la puissance minimum que doit pouvoir supporter le résistor. Je rappelle que :  $U = 25V$  et  $R = 560\Omega$ .

Secret (cliquez pour afficher)

Réponse :

D'après le résultat précédent et la formule suivante :

$$P = U * I$$

On trouve :

$$P = 25 * 44,64.10^{-3} \text{ (car ce sont des milli-ampères. Équivaut à : } P = 25 * 0,04464 \text{)}$$

$$P = 1,12W$$

Notre résistor doit donc pouvoir supporter une puissance de **1,12W**, choisissons donc un dont la puissance supportée est de 1,5W. (On prend une certaine marge dans les valeurs standards que nous offrent les constructeurs)

### Les associations

A présent, nous allons nous pencher sur l'association des résistors pour ensuite aborder un tout autre élément qui "regroupe" en quelque sorte ce qui suit.

### Montage série

On parle d'association série lorsque les dipôles sont "montés à la queue leu-leu". Ce terme n'est pas très technique, mais il permet de me passer d'une longue explication. 🤔 En bref, l'association série est vérifiée par la loi des mailles (que vous connaissez bien), car le courant est le même dans toute la branche. Voici trois résistors branchés en série :

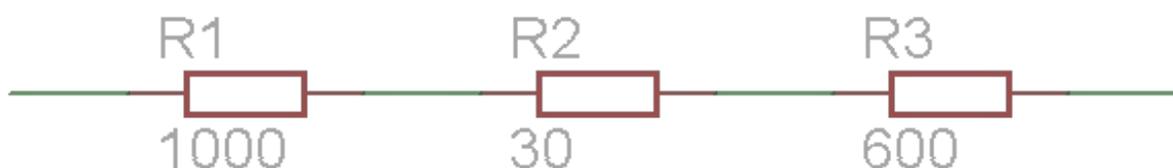


Figure 9 : Association série de résistors

### Le but d'une telle association ?

Si vous disposez d'un ensemble de résistors, mais qu'aucun ne correspond à votre besoin (ça c'est pas de bol !), il est possible d'associer des résistors de façon à créer la valeur de la résistance dont vous voulez disposer.

Par exemple :

Sur l'image précédente, vous avez trois résistors : un de 1 kOhms, un de 600 Ohms et un de 30 Ohms. Vous voulez fabriquer un résistor de 1,63 kOhms (comme par hasard 🤖), il vous suffit de mettre en série ces trois résistors ! (encore faut-il trouver des résistors de cette valeur 🤔)

### La formule

La formule qui permet ceci est toute simple. Lorsqu'on associe des résistors en série, la résistance qui en résulte est la somme des résistances de chaque résistor. En clair, on additionne les résistances :

$$R_{\text{équivalente}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Soit, pour notre exemple :

$$R_{\text{equivalente}} = 1000 + 30 + 600$$

$$R_{\text{equivalente}} = 1630\Omega$$

La formule générale est la même, mais avec le nombre correspondant de résistors :

$$R_{\text{equivalente}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

La lettre  $n$  correspond au nombre de résistors branchés en série. On peut nommer la somme de ces résistances  $R_{\text{equivalente}}$  (pour résistance équivalente, abrégé parfois en  $R_{\text{eq}}$ ).

### Qu'en est-il du courant ?

Évidemment, l'association de résistors en série implique une baisse de courant du fait que la valeur de la résistance augmente. Le calcul reste le même en utilisant la loi d'ohm. Cependant, il faut faire attention à la tension prise pour le calcul.

On peut schématiser l'image précédente sous la forme d'un seul résistor ayant pour valeur  $R_{\text{equivalente}}$  :

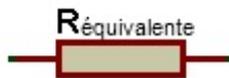


Figure 10 : résistor dont la valeur est  $R_{\text{equivalente}} = 1630\Omega$



A quoi ça sert ?

Eh bien, au lieu d'avoir trois résistors ayant chacun une résistance différente, on regroupe ces trois résistors en un seul (pour le modèle théorique seulement) qui aura une seule valeur de résistance. En plus, pour utiliser la loi d'ohm ce sera plus facile car il n'y aura que la tension aux bornes de ce résistor "total", si je puis l'appeler ainsi, et sa résistance. Soit deux paramètres contrairement au montage précédent où le nombre de paramètres est de 6 !

## Montage en dérivation

Au contraire du montage en série, lorsque plusieurs résistors sont associés en dérivation, la résistance globale diminue : le courant est donc plus intense.

Toujours avec nos mêmes résistors :

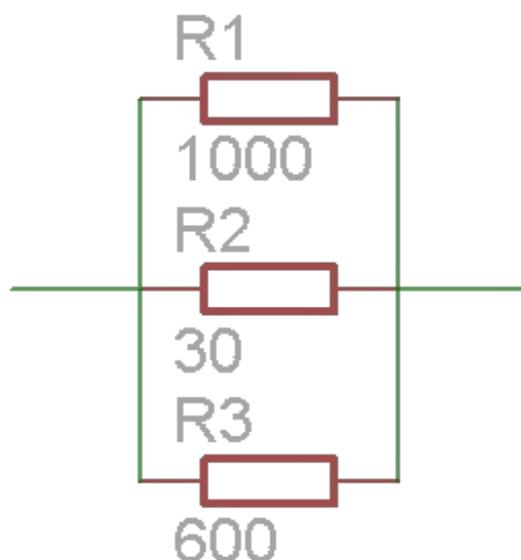


Figure 11 : Association parallèle de résistors

Le calcul pour déterminer la résistance équivalente n'est plus le même :

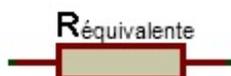
$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Soit pour notre exemple :

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{1}{30} + \frac{1}{600}}$$

$$R_{eq} = 27,78\Omega$$

Voilà pour nos trois résistors, que l'on peut tout aussi bien mettre sous cette forme :

Figure 12 : résistor dont la valeur est  $R_{equivalente} = 27,78\Omega$ 

### Formules générales

Alors, là, on a deux formules : celle lorsque l'on a trois résistors ou plus en parallèle (c'est celle que nous venons de voir à l'instant) :

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

Ou bien cette formule qui s'utilise uniquement lorsqu'il n'y a que deux résistors en parallèle :

$$\frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

Cette dernière formule est très pratique, mais ce qu'il est le plus c'est lorsque les deux résistors en parallèle ont la même valeur. Dans ce cas il suffit de diviser par deux la valeur de la résistance d'un résistor pour connaître la résistance globale.



Exemple :

Deux résistors de  $10k\Omega$  en parallèle donnerons une valeur totale de  $5k\Omega$ .

## Pont diviseur de tension



Suivez bien ce qui va suivre car ce sont des notions importantes et relativement simples en plus !

Comme son nom l'indique, un pont diviseur de tension permet de ... Diviser la tension ! Et vous allez vite comprendre pourquoi.

Prenons ce schéma avec deux résistors en série :

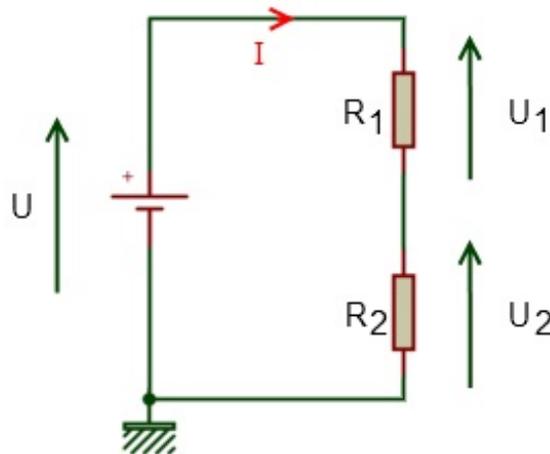


Figure 13 : Pont diviseur de tension, montage à vide

Nous allons rechercher la valeur de la tension  $U_2$ . Pour cela il va falloir la calculer. La procédure est la suivante :

- Dans un premier temps, on va d'abord écrire la formule littérale (sans valeur numérique) qui nous permet de calculer  $U_2$
- Ensuite, nous n'aurons plus qu'à appliquer cette formule avec les valeurs numériques

### Recherche de la formule littérale



Je vous avertis tout de suite : il faut que vous preniez l'habitude de trouver tous les paramètres que vous recherchez par les lois les plus simples qui soient. Autrement dit la **loi d'Ohm**, la **loi des mailles** et la **loi des nœuds**, et vous verrez que vous irez très loin en électronique juste avec ces formules ! 😊 Bon, pour bien commencer donc, c'est ce que nous allons faire.

### 1<sup>ère</sup> étape :

Pour commencer on va chercher à trouver la formule littérale ou bien l'expression de la tension  $U_2$ . On va utiliser la loi des mailles.

Le montage ci-présent comporte une seule maille, ce qui va simplifier la recherche. En effet, nous avons :

$$U - U_1 - U_2 = 0$$

Donc, grâce à une manipulation génétique très savante, on trouve :

$$U_2 = U - U_1$$

Ouf ! Heureusement que je vous ai aidé. 😊

### 2<sup>e</sup> étape :

Là ça va être légèrement plus compliqué car il va falloir utiliser la loi d'ohm.

Nous avons l'intensité  $I$  qui vaut :

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

(Ou bien  $I = \frac{U_1 + U_2}{R_1 + R_2}$ , car  $U = U_1 + U_2$  d'après la loi des mailles)

Or on sait que, d'après la loi d'ohm :

$$U_2 = R_2 * I$$

On en conclut donc, en remplaçant  $I$  par l'expression que l'on vient de trouver, que :

$$U_2 = R_2 * \frac{U}{R_1 + R_2}$$

C'est fini ! 😊

Vous voyez que c'était simple ! Bon, je vous réécris la formule sous une forme plus commune :

$$U_2 = \frac{U * R_2}{R_1 + R_2}$$

### 3<sup>e</sup> étape :

Application numérique avec les valeurs suivantes :  $U = 12V$  ;  $R_1 = 1k\Omega$  ;  $R_2 = 3k\Omega$ . Je vous laisse chercher et ensuite je vous donnerai la réponse ! 🧐

**Secret (cliquez pour afficher)**

On utilise la formule que je viens de vous donner :

$$U_2 = \frac{U * R_2}{R_1 + R_2}$$

Et on remplace par les valeurs numériques :

$$U_2 = \frac{12 * 3000}{1000 + 3000}$$

$$U_2 = 9V$$

Et là, magie, la tension aux bornes de notre résistor  $R_2$  a bien chuté ! 🎉

### Pont diviseur de tension chargé



C'est super ! Je vais enfin pouvoir brancher mon baladeur MP3 qui fonctionne sous 3V avec une pile 9V! 😊

Je suis malheureusement dans le regret de t'informer que cela ne va pas être possible dans le sens où la formule précédente ne tient pas compte de la charge à sa sortie. Regardons pourquoi.

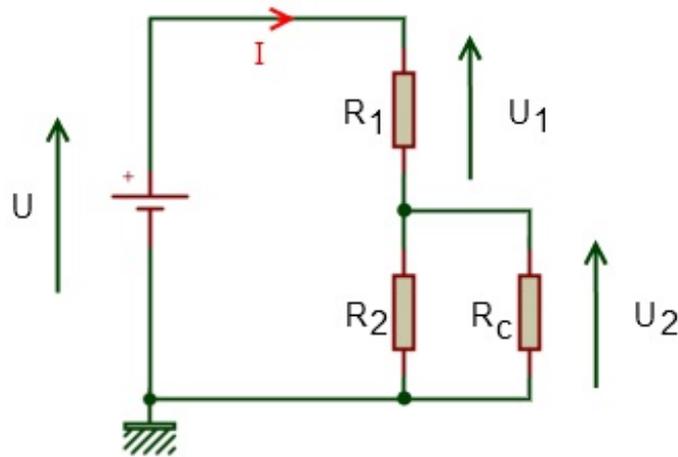


Figure 14 : Pont diviseur de tension, à charge

Oui, vous l'avez vu ? On rajoute effectivement une charge à notre pont diviseur. Une charge résistive bien entendu, ce qui aura pour effet de modifier la résistance totale de  $R_2$  et  $R_c$  qui sont à présent en parallèle.

On se retrouve avec la résistance équivalente :

$$R_{eq} = \frac{R_2 * R_c}{R_2 + R_c}$$

La tension U2 devient donc :

$$U_2 = \frac{U * R_{eq}}{R_1 + R_{eq}}$$

(Ce qui correspond également à :  $U_2 = \frac{U * \frac{R_2 * R_L}{R_2 + R_L}}{R_1 + \frac{R_2 * R_L}{R_2 + R_L}}$ )

Et avec nos valeurs numériques, pour une résistance de charge disons de  $R_c = 1,5k\Omega$  :

$$R_{eq} = \frac{R_2 * R_c}{R_2 + R_c}$$

$$R_{eq} = \frac{3000 * 1500}{3000 + 1500}$$

$$R_{eq} = 1k\Omega$$

Soit :

$$U_2 = \frac{U * R_{eq}}{R_1 + R_{eq}}$$

$$U_2 = \frac{12 * 1000}{1000 + 1000}$$

$$U_2 = 6V$$

La tension  $U_2$  a donc bien baissé et tombe à 6V au lieu de 9V. C'est pourquoi nous n'avons pas recours à ce type de montage pour abaisser la tension afin d'alimenter un montage quelconque. D'autant plus que le courant fourni par ce montage est très faible. En revanche, et ce n'est pas pour rien que je vous l'ai montré, il est très employé pour créer des tensions de références.



Pour ceux qui insistent, nous verrons plus loin comment faire pour utiliser ce montage à des fins d'alimentation. 😊



Et c'est possible un pont diviseur à plusieurs résistors ?

Tout à fait ! Nous avons vu que mettre en série plusieurs résistors revenait à sommer leur résistance. Par conséquent si on a plusieurs résistors en série, alors on a un pont diviseur de tension. En plus il permet d'avoir plusieurs tensions de sortie pour une seule tension d'entrée ! 💡

Pour terminer sur le pont diviseur de tension, je vous donne [un lien vers un site internet](#) qui vous permettra de calculer rapidement la valeur de vos résistors pour votre pont diviseur. 😊

## Les résistors variables

Le résistor étant le composant principal de l'électronique, il en existe par ce fait une innombrable variété. Je vais vous présenter dans cette partie quelques-unes de ces variétés, sans entrer dans un détail complexe. 😊



Je rappelle que j'ai employé le terme résistor pour parler du composant électronique. Cependant, ce n'est pas un terme juste puisqu'il vient de l'anglais *resistor*. C'est donc un anglicisme. En Français, pour désigner le composant tout comme le phénomène physique, on utilise le terme *résistance*. C'est pourquoi, les termes qui vont suivre ne seront pas composés du mot *résistor* mais *résistance* (exemple : *thermistance* et non *thermistor*, *varistance* et non *varistor*, etc.).

### Qu'est-ce que c'est ?

De façon générale, un résistor variable est un composant dont la résistance... varie, bah oui. Bon.

Cette variation est fonction de nombreux facteurs. Généralement, on utilise une action mécanique pour faire varier cette résistance, notamment grâce à un axe de rotation. Mais il existe tout un panel de résistors variables, tel que la thermistance, la varistance, la photorésistance et j'en passe !

Dans cette partie, je vais vous présenter certains résistors variables assez employés en électronique. Commençons par un très utilisé : le potentiomètre.

## Le potentiomètre

Le potentiomètre est donc un résistor variable. Sa valeur résistive change selon la position d'un curseur qui se déplace sur une piste au carbone grâce à un axe de rotation que l'on vient manipuler avec les doigts ou un tournevis. Je dis ça mais j'omets de vous dire qu'il en existe d'autre qui n'ont pas d'axe, mais un curseur qui se déplace linéairement.

Ainsi, on peut trouver des potentiomètres :

- Rotatif ( ex : bouton de volume sur une chaîne hi-fi )
- Rectiligne ( ex : curseur sur une table de mixage )
- Avec cran central permettant d'avoir une position 'zéro' au centre de la piste ( ex : bouton permettant de faire la balance gauche/droite sur les amplificateurs )
- Avec position arrêt (petit cran lorsqu'on le tourne à fond à gauche, lié à un interrupteur)
- Et bien d'autres !

Sur les photos qui suivent, vous pouvez voir quelques échantillons de potentiomètres :

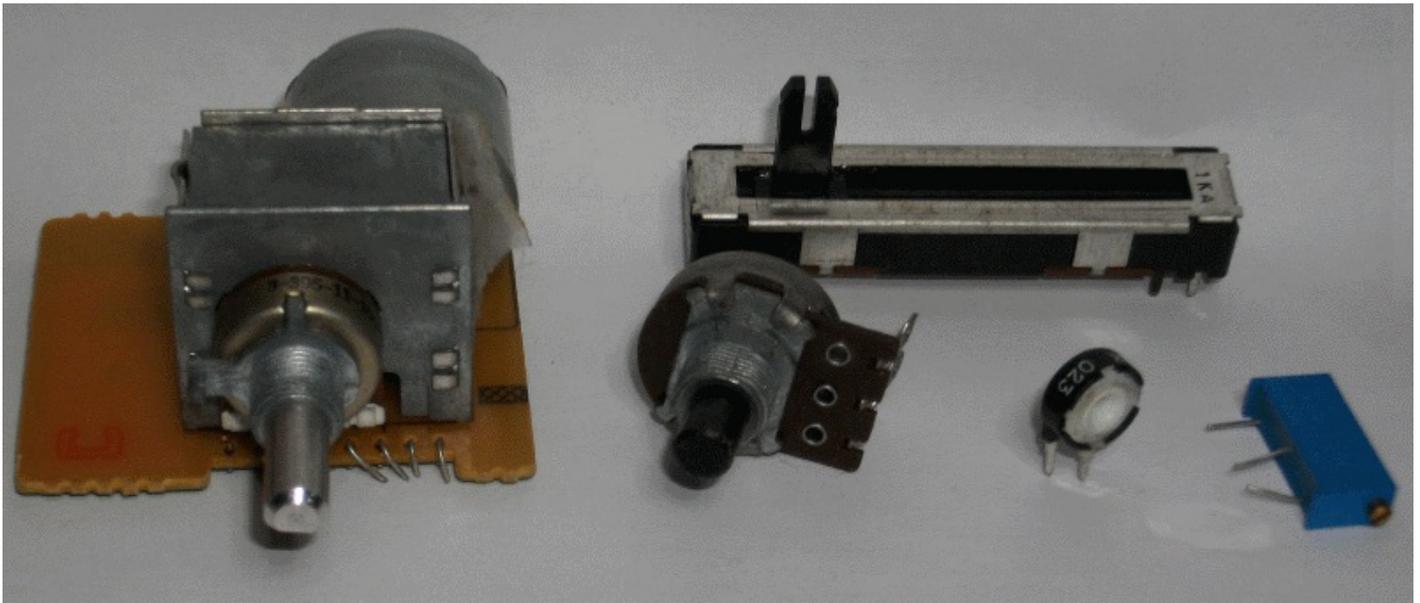


Figure 15 : potentiomètres divers

Si vous observez bien la photo, vous constaterez que les potentiomètres sont des composants qui possèdent trois broches. Ce sont donc des **tripôles**.

### Symbole

Le symbole d'un résistor variable diffère à celui du résistor. Pas de grand-chose, il suffit de lui rajouter une broche, tout au plus :

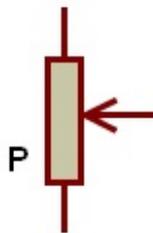


Figure 16 : symbole du potentiomètre



Remarquez la flèche sur la troisième broche, elle n'est pas nécessaire et ce n'est donc pas dramatique qu'elle soit oubliée.

### Structure

Parlons à présent de la structure des résistors variables. Alors, comme ils ont tous une structure différente, je vais prendre pour exemple le potentiomètre rotatif qui fonctionne exactement de la même manière qu'un potentiomètre linéaire, mais pas au point de vue structurel.

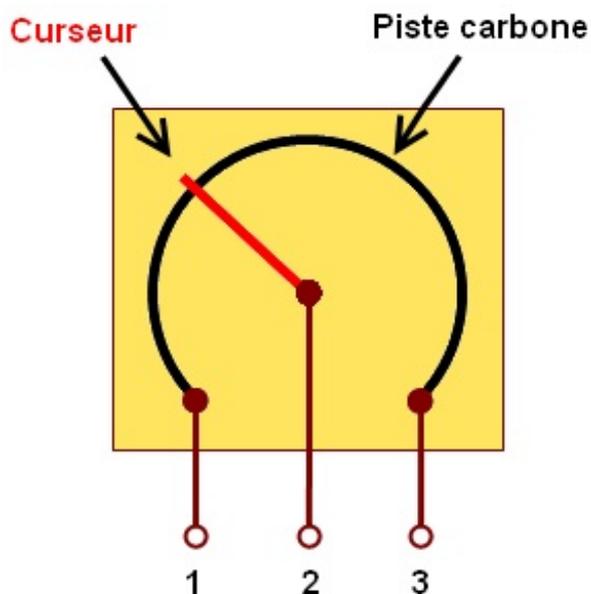


Figure 17 : structure interne d'un potentiomètre rotatif

J'ai repéré les broches du potentiomètre par les chiffres 1, 2 et 3. Cela me sera utile pour l'explication qui va suivre. Ensuite, le "truck" jaunâtre que vous voyez, c'est, en quelque sorte, l'armature et la surface sur laquelle est collée la piste carbone et où est ancré l'axe du curseur.

### Fonctionnement

Je vais vous expliquer comment fonctionne la structure interne et il en découlera, l'explication de son fonctionnement tellement elle sera devenue évidente !

D'abord, tout comme le résistor au carbone, c'est également le carbone qui est employé pour créer le phénomène de résistance. On en conclut qu'entre les broches 1 et 3 se trouve une résistance. La valeur de cette dernière est fixe, prenons par exemple une valeur de  $12k\Omega$ .

En revanche, là où la valeur n'est pas fixe, c'est bien entre les broches 1 et 2 ET les broches 2 et 3. En effet, le curseur vient se positionner sur un point quelconque de la piste carbone. Par conséquent, on peut schématiser le potentiomètre comme sur l'image qui suit, avec une résistance de valeur variable entre son point 1 et 2, mais aussi une autre résistance de valeur variable entre son point 2 et 3 :

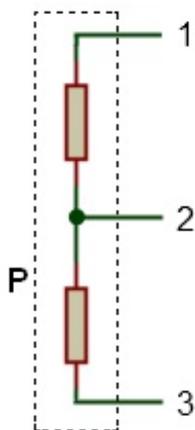


Figure 18 : schéma équivalent interne d'un potentiomètre

### Utilisation en pont diviseur

Vous avez dû certainement remarquer que le schéma précédent est celui d'un pont diviseur de tension. Eh bien c'est ce qu'est un potentiomètre ! Sauf que c'est un pont diviseur de tension variable.

La position du curseur est comprise entre 0 et 1. Ce 0 et ce 1 proviennent du pourcentage de la longueur de la piste résistive carbone du potentiomètre. Pour être un peu plus clair, la longueur de la piste carbone est de 100%. Et, le curseur se trouve quelque part au milieu de ces 100%. C'est pourquoi il est compris entre 0 et 1, ou si vous préférez entre 0 et 100%.

Bon, je vous fais un dessin :

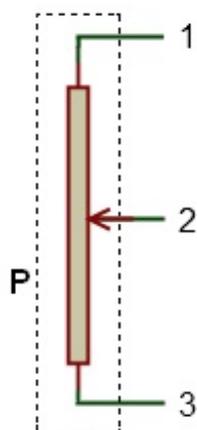


Figure 19 : curseur du potentiomètre

Voilà ce que cela donnerait, par exemple:



Figure 20 : course du curseur entre 0 et 100%

La plupart du temps, on nomme  $\alpha$  (alpha) le pourcentage qui donne la position du curseur. Sur l'image précédente, nous avons donc, pour la partie rouge :  $\alpha = 40\%$  ou  $\alpha = 0,4$ . Et pour la partie verte, on a la totalité (rouge + vert) moins la partie rouge. Soit :  $100\% - 40\% = 60\%$ , ce qui revient à :  $1 - 0,4 = 0,6$ . On en conclut les formules suivantes :

$$Partie_{verte} = 1 - \alpha$$

$$Partie_{rouge} = \alpha$$



Attention donc, on a deux choix : soit celui de prendre  $\alpha$  pour la position du curseur entre la broche 1 et 2 du potentiomètre ; soit celui de prendre  $\alpha$  pour la position du curseur entre la broche 2 et 3 du potentiomètre.

Pour en revenir avec nos deux résistances :

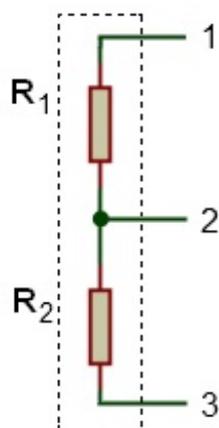
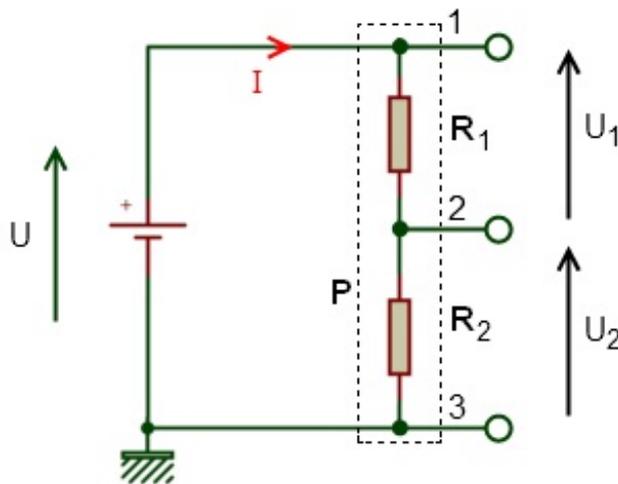


Figure 21 : schéma interne du potentiomètre

Pour nos calculs, je prendrais :  $R_1 = Pot * (1 - \alpha)$ ;  $R_2 = Pot * \alpha$ ;  $Pot$  est la valeur totale de la résistance interne du potentiomètre, soit  $Pot = R_1 + R_2$ . Cherchons la tension  $U_2$  sur le montage suivant (merci de ne pas répondre "elle est ici" en montrant bêtement du doigt la tension  $U_2$  😞):

Figure 22 : calcul de la tension  $U_2$ 

D'après la loi du pont diviseur de tension, on a la formule suivante :

$$U_2 = \frac{U * R_2}{R_1 + R_2}$$

Or, je viens de vous préciser la valeur littérale de chacune des inconnues :

$$U_2 = \frac{U * (Pot * \alpha)}{(Pot * (1 - \alpha)) + (Pot * \alpha)}$$

On développe :

$$U_2 = \frac{U * Pot * \alpha}{Pot - Pot * \alpha + Pot * \alpha}$$

Puis on simplifie :

$$U_2 = \frac{U * Pot * \alpha}{Pot}$$

$$U_2 = U * \alpha$$

Donc, quelle que soit la position du curseur, on connaît la valeur de la tension  $U_2$ ! 😊

### Exercice

Bien. Maintenant, je vous laisse faire l'application numérique avec les valeurs suivantes :  $I = 1\text{mA}$ ;  $Pot = 12\text{k}\Omega$ ;  $\alpha = 0,75$  et  $R_1 = Pot * \alpha$ .

Consigne : Trouver les valeurs numériques de  $U$ ;  $U_1$ ;  $U_2$ ;  $R_1$  et  $R_2$ .

C'est parti!

...

De l'aide ? 🤔

**Secret** (cliquez pour afficher)

Aller, je vous aide, voilà la démarche à suivre :

- D'abord, calculer  $R_1$
- En déduire  $R_2$
- Ensuite, calculer  $U$
- Puis, calculer  $U_2$
- Enfin, calculer  $U_1$

A vous de jouer !

Correction !

**Secret** (cliquez pour afficher)

Solution : J'ai suivi la démarche que je vous ai donné, voilà ce qui en résulte :

1<sup>ère</sup> étape :

$$R_1 = Pot * \alpha$$

$$R_1 = 12.10^3 * 0,75$$

$$R_1 = 9k\Omega$$

2<sup>ème</sup> étape :

$$P = R_1 + R_2$$

$$R_2 = Pot - R_1$$

$$R_2 = 12.10^3 - 9.10^3$$

$$R_2 = 3k\Omega$$

3<sup>ème</sup> étape :

D'après la loi d'ohm :

$$U = Pot * I$$

$$U = 12.10^3 * 1.10^{-3}$$

$$U = 12V$$

4<sup>ème</sup> étape :

Là, ça se complexifie un peu car il faut utiliser la loi du pont diviseur de tension :

$$U_2 = \frac{U * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = \frac{12 * 3.10^3}{9.10^3 + 3.10^3}$$

$$U_2 = 3V$$

**5<sup>ème</sup> étape :**

D'après la loi des mailles :

$$U - U_1 - U_2 = 0$$

$$U_1 = U - U_2$$

$$U_1 = 12 - 3$$

$$U_1 = 9V$$

Et on a fini ! 😊

C'était pas bien sorcier, il suffisait d'appliquer les formules que vous êtes censé connaître. Pour conclure, on trouve les valeurs numériques suivantes :  $U = 12V$ ;  $U_1 = 9V$ ;  $U_2 = 3V$ ;  $R_1 = 9k\Omega$  et  $R_2 = 3k\Omega$ .

### Utilisation en "résistance variable"

La seule utilisation du potentiomètre ne se limite pas au pont diviseur de tension, car l'on peut également apporter une petite modification à ce dernier pour créer un **résistor variable**.

Un résistor variable est en fait un résistor (donc il possède deux broches) qui a la faculté d'avoir une résistance qui varie selon différents facteurs. On peut noter certains types de résistors variables qui réagissent en fonction de la lumière, de la température, etc. Et, ce que nous allons essayer de faire, c'est de transformer notre potentiomètre (à trois broches) en résistor variable (à deux broches).



Comment diable faire de notre potentiomètre à trois broches, un résistor variable à deux broches ?

En reliant deux broches entre elles pard ! 😊

Oui, tout simplement, regardez plutôt :

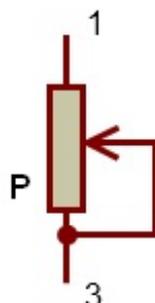


Figure 23 : utilisation du potentiomètre en résistor variable



Comment ça fonctionne ?



Pour cette configuration, on utilise plus que la broche 1 et 3. Je vais me passer d'explications fastidieuses et vous montrer ceci :

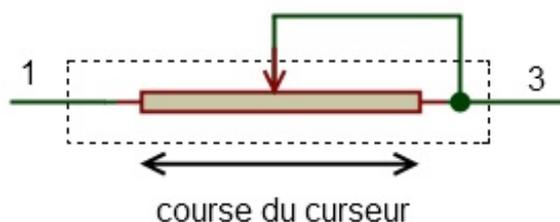


Figure 24 : course du curseur du potentiomètre en "mode" résistor variable

Ce que l'on peut observer - en précisant que le grand résistor à l'intérieur du potentiomètre symbolise la piste carbone de ce dernier - plus le curseur s'éloigne de la broche 1, plus la résistance entre la broche 1 et 3 est grande. Et inversement, plus le curseur se rapproche de la broche 1, plus la résistance entre les deux broches diminue.

Entre les broches 1 et 3, la valeur de la résistance, en prenant le même exemple que tout à l'heure, peut varier de  $0\Omega$  à  $12k\Omega$ . Nous avons donc bien un résistor variable à deux broches "fabriqué" à partir d'un potentiomètre (linéaire, rotatif, etc.) à trois broches.

Il y a même une utilisation encore plus simple en résistor variable, il s'agit de n'utiliser que la broche du milieu du potentiomètre et une de ces deux autres broches :

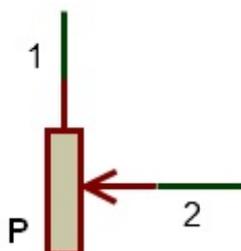


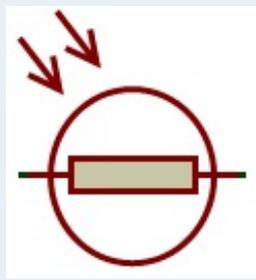
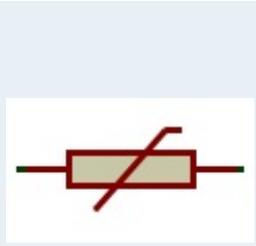
Figure 25 : utilisation du potentiomètre en résistor variable - utilisation de deux broches seulement et fonctionnement identique que précédemment

Bon, ben on presque tout vu, il ne me reste qu'à parler de quelques résistors variables et vous enseigner le code couleur...

## Les autres résistors variables

Il y en a plein, pour ne pas dire trop, je vais donc en répertorier quelques-uns dans un tableau.

Nom	Fonction	Symbole	Photo
Résistor variable	Là, c'est le composant général		(Pas de photo)
Thermistance	Résistance dont la valeur varie selon la température		

	ambiante à la thermistance		
Photorésistance	Résistance qui varie avec la luminosité		
Varistance	Plus complexe, la varistance possède une très grande résistance qui chute dès lors que le courant devient trop important		

Voilà, il n'y a pas grand-chose d'autre à dire, à part que ces composants sont des capteurs et qu'ils servent pour les applications domotiques ou industrielles, voir même "loisirique". On aura peut-être l'occasion d'utiliser ces capteurs...

### Code couleur

Vous avez peut-être remarqué que sur la photo de résistor que je vous ai montrée au début de chapitre, il avait des anneaux de couleur. Et bien c'est un code, appelé judicieusement : **code couleur** ! Ce code permet de repérer la valeur en Ohm de la résistance d'un résistor. Grâce à ce code, on peut donc lire la valeur de la résistance d'un résistor, à condition de le connaître par cœur !

Couleur	Chiffre	Coefficient multiplicateur	Puissance	Tolérance
Noir	0	1	$10^0$	-
Brun	1	10	$10^1$	$\pm 1\%$
Rouge	2	100	$10^2$	$\pm 2\%$
Orange	3	1000	$10^3$	-
Jaune	4	10 000	$10^4$	-
Vert	5	100 000	$10^5$	$\pm 0.5\%$
Bleu	6	1 000 000	$10^6$	$\pm 0.25\%$
Violet	7	10 000 000	$10^7$	$\pm 0.10\%$
Gris	8	100 000 000	$10^8$	$\pm 0.05\%$
Blanc	9	1 000 000 000	$10^9$	-
-	-	-	-	-
Or	0.1	0.1	$10^{-1}$	$\pm 5\%$
Argent	0.01	0.01	$10^{-2}$	$\pm 10\%$
(absent)	-	-	-	$\pm 20\%$

Vous le voyez, chaque couleur est associée à un chiffre et une puissance de 10. Pour comprendre son fonctionnement, nous allons prendre des exemples. J'ai représenté sur cette image des résistors dont le code couleur est inscrit dessus.

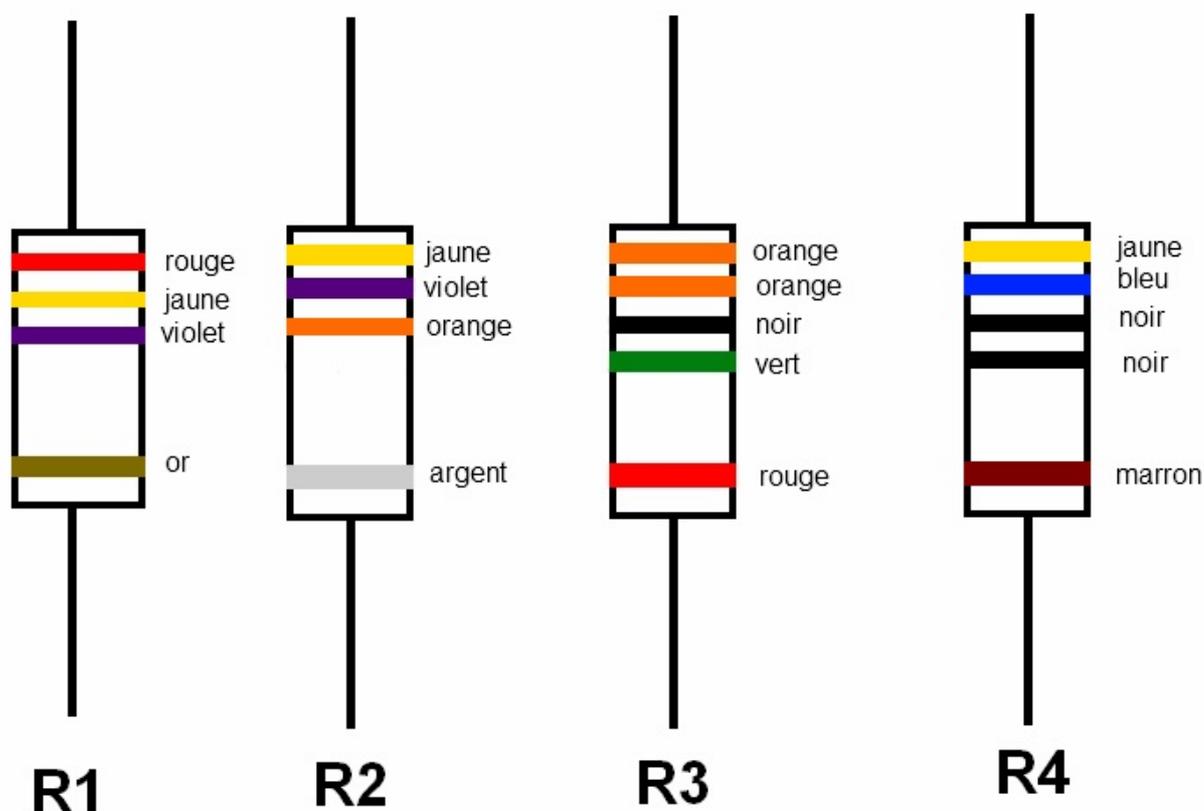


Figure 26 : Exercice de lecture du code couleur des résistances

### Lecture du code

Pour lire le code couleur, il y a une démarche à effectuer. En premier lieu, il faut repérer le sens de lecture. Oui, il y a un sens de lecture ! Théoriquement, il faut repérer l'anneau (la bande de couleur) le plus éloigné des autres. En général c'est le cas, mais des fois, toutes les bandes ont un même espacement, ce qui n'est pas pratique. On repère alors toujours un anneau au bord (ou à gauche ou à droite), celui-ci est en général de couleur **or** (qui revient le plus souvent) ou **argent** ou **rouge** (mais moins souvent) ou même **marron**. Les autres sont plus rares.

Une fois cette étape réalisée, voyons ce qu'il faut faire...

**... dans le cas d'un résistor à quatre bandes (anneaux) de couleurs :**

- la première bande sur la résistance correspond au premier chiffre ;
- la deuxième bande correspond au deuxième chiffre ;
- la troisième bande correspond à un nombre multiplicateur ;
- la quatrième bande (la plus éloignée de toute) correspond à la tolérance de la résistance.

**... dans le cas d'un résistor à cinq bandes :**

- la première bande correspond au premier chiffre ;
- la deuxième bande correspond au deuxième chiffre ;
- la troisième bande correspond au troisième chiffre ;
- la quatrième bande est le coefficient multiplicateur ;

- la cinquième bande (la plus éloignée de toute) correspond à la tolérance.

### *Prenons des exemples*

L'image avec les quatre résistors sera notre support pour comprendre la lecture du code couleur. Les résistors sont orientés "vers le haut" pour que la lecture se fasse de haut en bas.

#### *Le premier résistor*

Dans le sens de la lecture, on a un anneau **rouge**, **jaune** et **violet**. Pour l'instant oubliez le dernier qui nous permet, entre autres, de repérer le sens de lecture.

- **rouge** : correspond au chiffre 2
- **jaune** : correspond au chiffre 4
- **violet** : correspond à l'anneau multiplicateur (cas d'un résistor à quatre bandes) de  $10^7$

Nous venons de faire la plus grosse étape de la lecture du code. Maintenant, il ne nous reste plus qu'à calculer l'ensemble. Il suffit, en fait, de multiplier les deux premiers chiffres lu, en les apposant, par l'anneau multiplicateur :

$$R = 24 * 10^7 \Omega$$

$$R = 240\,000\,000 \Omega$$

$$R = 240M\Omega$$

Nous avons donc un résistor de 240 mega ohm ! C'est assez énorme comme valeur.



Et le dernier anneau, on l'oublie ? 🤔

Ha oui ! Et bien le dernier anneau indique la tolérance de la résistance. C'est en fait, la précision que celle-ci a à se rapprocher de sa valeur marquée.

Pour ce premier résistor, l'anneau de tolérance est de couleur **or**. Le résistor possède donc une tolérance de  $\pm 5\%$ . La valeur réelle du résistor sera donc comprise entre + 5% de 240 MOhms et - 5% de 240MOhms.

5% de 240MOhms :

$$x = \frac{240000000 * 5}{100}$$

$$x = 12000000\Omega$$

$$\text{Soit : } x = 12M\Omega$$

La valeur du résistor sera donc comprise entre 228MOhms et 252MOhms ! L'écart relatif n'est donc pas négligeable !!!! C'est pourquoi, lorsque l'on a besoin de précision, il faut choisir un résistor avec une meilleure tolérance. Dans le cas d'un résistor de faible valeur, le problème est moins conséquent.

D'autres exemples :

#### **Secret** (cliquez pour afficher)

##### *Le deuxième résistor*

Idem, pour lire la valeur de la résistance du deuxième résistor, on suit le même protocole.

- **jaune** : correspond au chiffre 4
- **violet** : correspond au chiffre 7
- **orange** : correspond à la multiplication par  $10^3$

- **argent** : tolérance de  $\pm 10\%$

Notre résistor a donc une résistance de 47kOhms et une tolérance de  $\pm 10\%$ . Sa vraie valeur est donc comprise entre 42,3kOhms et 51,7kOhms.

### Le troisième résistor

Ne prenez pas peur alors qu'il y a seulement un anneau en plus. La procédure de lecture reste la même :

- **orange** : correspond au chiffre 3
- **orange** : correspond au chiffre 3
- **noir** : correspond au chiffre 0
- **vert** : correspond au multiplicateur par  $10^5$
- **rouge** : tolérance à  $\pm 2\%$

La résistance de ce résistor est :

$$330 * 10^5 = 33000000 = 33M\text{Ohms}$$



Le zéro qui est perdu est attendu par ses parents à l'accueil du magasin après les deux premiers chiffre du résistor a son importance ! Car il indique une plus grande précision du résistor.

Si on calcul la vraie valeur dans laquelle il se trouve, on a une valeur minimale de la résistance de 32,34MOhms et une valeur maximale de 33,66MOhms

### Le dernier résistor

- jaune** : chiffre 4
- bleu** : chiffre 6
- noir** : chiffre 0
- noir** : multiplicateur par 1
- marron** : tolérance de  $\pm 1\%$

Valeur de la résistance : 460Ohms avec une tolérance de  $\pm 1\%$ . soit une vraie valeur qui se situe entre 455,4Ohms et 464,6Ohms.

## Pourquoi apprendre ce code par cœur ?

C'est vrai qu'il suffirait d'utiliser un ohmmètre qui mesurerait pour nous la valeur de la résistance. Ce qui serait une solution assez simple (et très utile pour les fainéants 🤪). Mais, dans certains cas, il est impossible de pouvoir mesurer cette résistance, c'est donc à vous de lire la valeur inscrite sur le résistor. Quand on connaît ce code par cœur, la lecture se fait en moins d'une seconde ! (histoire d'épater les copains 😎)

## Moyen mnémotechnique

Voici un moyen pour vous rappeler du code couleur (le blanc est ici représenté par du gris clair, sans lequel vous ne verriez pas le mot bêtise) :

**NE BUVEZ RIEN OU JEUNEZ VOILA BIEN VOTRE GRANDE BÊTISE**

Avec ça, vous avez de grandes chances de ne pas oublier le code. Faites attention à ne pas confondre la place du Brun, du Bleu et du Blanc, ni du Vert et du Violet.

Le chapitre est terminé en espérant que vous avez tout retenu, car vous ne pourrez aller plus loin sans cette connaissance...

Si vous avez un manque de sommeil des points qui ne sont pas très clairs à vos yeux, relisez, c'est important ! 🧑🏻🔧



## Le condensateur en régime continu

Dans ce chapitre nous apprendrons quelques-unes des propriétés du condensateur, qui sont très nombreuses. C'est un composant essentiel en électronique car il est hyper utilisé, puis aussi est présent de partout ! Par exemple, quand il y a de l'orage, il y a un énorme giga-titanesque condensateur entre le ciel et la Terre ! On le retrouve aussi, enfin du moins on retrouve ses propriétés physiques dans les smartphones à dalles capacitives. Néanmoins, le condensateur est aussi un parasite qui est présent dans la plupart des composants électroniques quand on s'approche des hautes fréquences.

Mais tout ça, nous allons le voir dans ce chapitre, je vous laisse le découvrir.. 😊

### Introduction et principes

Le condensateur est sans doute l'un des composants les plus utilisés en électronique. Sur la photo qui suit, vous pouvez voir un condensateur de type "électrochimique", qui est un type parmi tant d'autres.



Figure 1 : Condensateur de type électrochimique

### Symbole

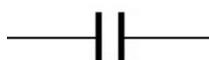


Figure 2 : Symbole du condensateur



Nous verrons plus bas qu'il existe d'autres symboles pour le condensateur, qui diffèrent selon certains types de condensateurs.

### A quoi ça sert ?

Les apparences sont parfois trompeuses, mais pas pour le condensateur. Ce gros cylindre est une véritable bête de compétition ! A l'intérieur, se dissimule un liquide qui peut fuir du cylindre en cas d'utilisation trop poussée du condensateur. On en reparle plus. 😊

Plus sérieusement (même si ça l'était déjà 😊) le condensateur possède plusieurs propriétés toutes très intéressantes. Passons en revue quels sont les rôles que joue le condensateur dans un montage électronique. Cette liste étant non exhaustive :

- Accumulateur d'énergie
- Mémoire
- Filtre antiparasites
- Évite les discontinuités de tension
- Temporisateur
- Lissage de tension
- ...

Plus globalement, on va retrouver le condensateur dans un rôle de **filtrage**, de **stockage de l'énergie** ou encore de **mémoire**.



N'allez surtout pas croire que les mémoires amovibles que vous utilisez (carte SD, clef USB, ...) sont fabriquées avec des condensateurs. Les technologies employées sont bien plus complexes que ça, même si certaines d'entre elles utilisent des "condensateurs parasites" pour fonctionner (notamment la mémoire vive ou *RAM*).

## Commençons par les principes

La constitution d'un condensateur réside sur le même principe, quelle que soit la technologie du condensateur. Il s'agit de deux **armatures** (deux plaques métalliques très fines) séparées d'un isolant appelé le **diélectrique**.

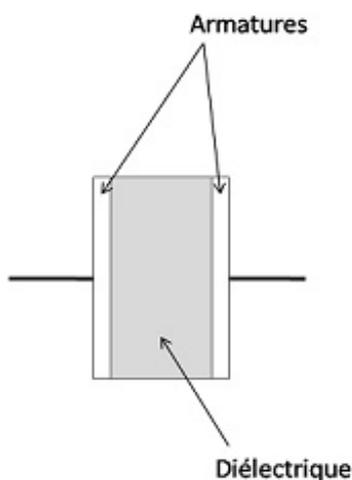


Figure 3 : modélisation d'un condensateur plan

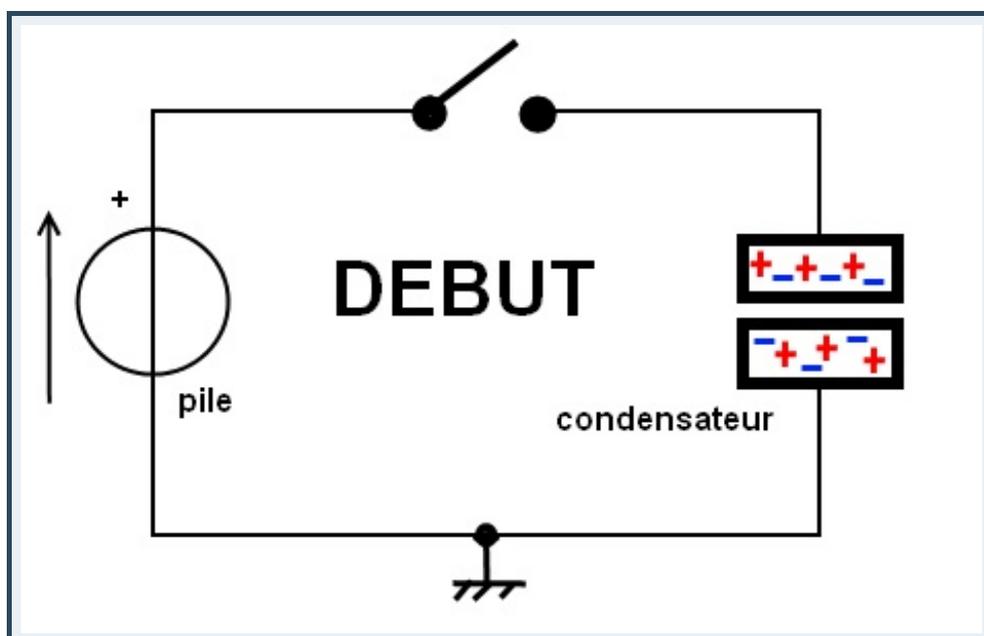
Le principe de fonctionnement du condensateur en régime continu est relativement simple à comprendre. Pour expérience, on peut le brancher sur un générateur continu, il se charge ; on débranche le condensateur du générateur et on connecte une charge (résistor) à ses bornes, le condensateur se décharge. Simple non ?

Si nous regardions ces phénomènes plus en détail.

## Charge d'un condensateur

Le montage composé d'un générateur de tension continue (une pile), un interrupteur, et un condensateur *C*. Il va nous aider à bien comprendre le fonctionnement en charge du condensateur.

- 1- On ferme l'interrupteur entre le générateur de tension continue et le condensateur. Ce qui a pour effet de laisser circuler le courant dans le montage.
- 2- Le condensateur commence à se **charger**, par l'occasion on voit un courant  $i$  qui va du générateur vers le



condensateur, mais attention, ce courant ne traversera pas d'une armature à l'autre car rappelez-vous ces armatures sont électriquement isolées (il y a un isolant entre les deux).

- 3- Le condensateur a fini de se charger, alors le courant  $i$  initialement apparu, disparaît. On dit aussi que le condensateur est arrivé à **saturation**.
- 4- On ouvre l'interrupteur, plus aucun courant ne circule et le condensateur reste chargé.

Figure 4 : Montage charge de condensateur



Cette opération se fait tellement vite, qu'au moment où vous fermez l'interrupteur, le condensateur est déjà presque entièrement chargé !

### Quelques explications

Tout d'abord, il faut vous rappeler que les deux armatures qui constituent un condensateur sont **isolées électriquement** grâce au diélectrique. Elles n'ont donc aucun contact physique entre elles. Le condensateur se comporte donc comme un interrupteur ouvert, ce qui implique qu'aucun courant ne le traverse.



Mais si c'est un interrupteur ouvert, alors comment ça se fait que la pile ait débitée un courant (indiqué en rouge sur le montage précédent) ? 🤔

Au départ (noté DÉBUT sur l'image), le condensateur possède une charge électrique neutre entre ses deux armatures. Comme ceci :

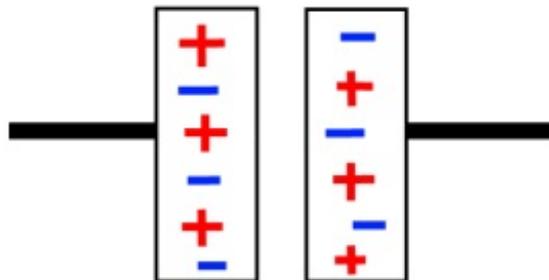


Figure 5 : Charge électrique d'un condensateur "vide"

Lorsque l'on charge un condensateur, on manipule intrinsèquement ces charges afin de les arranger de manière à ce que les charges positives (**plus**) soient dans une des deux armatures et les charges négatives (**moins**) soient dans l'autre armature. C'est donc le déplacement des charges électriques qui crée le courant "à travers" le condensateur.



En aucun cas ce déplacement de charge se fait à travers le diélectrique du condensateur qui, rappelons-le, est un isolant.

Pour résumer un peu ce qui vient d'être expliqué, je vous propose cette petite liste :

- le condensateur est un réservoir de charge électrique qui se charge hyper vite par rapport à une batterie par exemple
- aucun courant électrique ne le traverse



Un condensateur peut être chargé qu'à moitié ou au tiers. Enfin il peut ne pas être chargé complètement, il n'est alors pas à saturation.

## Décharge d'un condensateur

La décharge du condensateur ne peut s'effectuer que si le condensateur est initialement chargé. Autrement dit, il faut que les charges soient rangées (les "plus" d'un côté, les "moins" de l'autre) dans ses armatures.

Le principe de la décharge d'un condensateur est identique à celui de sa charge. Sauf que le montage est différent :

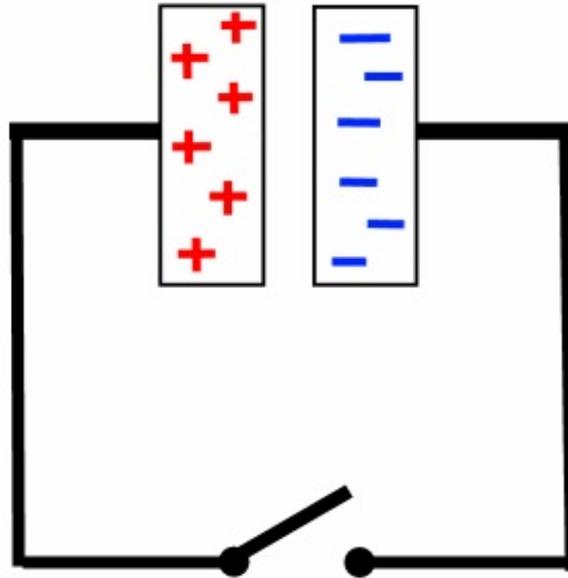


Figure 6 : Décharge d'un condensateur à travers un fil

Quand on décharge un condensateur, on peut le faire à travers un fil électrique ou bien à travers une charge (résistance). Les charges électriques qui étaient alors séparées selon leur charge (positive et négative) vont alors pouvoir se retrouver et redevenir homogènes dans chaque armature.



En pratique, décharger un condensateur à travers un fil peut créer des étincelles d'autant plus fortes selon la tension à laquelle le condensateur est chargé. Attention également de ne pas mettre les doigts dessus, sinon c'est vous qui allez prendre une bonne secousse. 😱

## Capacité d'un condensateur

La **capacité** d'un condensateur est la taille de sa réserve de charges électriques. 🤔 En clair, c'est ça capacité à contenir les charges électriques, ce qui veut dire que plus la capacité d'un condensateur est grande, plus il peut contenir de charges électriques.

### Unité

L'unité de sa capacité se mesure en **Farad** du non de **Michael Faraday**. On note cette unité avec un **F** majuscule.

### Ordre de grandeur du Farad

Ordres de grandeur du Farad

Nom	Symbole	Puissance de 10	Commentaires
Farad	F	$10^0$	Pas utilisé en électronique faibles signaux

milli Farad	mF	$10^{-3}$	Peu utilisé (filtres)
micro Farad	$\mu\text{F}$	$10^{-6}$	Le plus utilisé
nano Farad	nF	$10^{-9}$	Beaucoup utilisé
pico Farad	pF	$10^{-12}$	Souvent utilisé
femto Farad	fF	$10^{-15}$	Pas utilisé (électronique HF)

## Notion de temps

Je vous propose maintenant une autre expérimentation, pour laquelle nous allons ajouter un résistor aux montages précédents

## Charge et décharge d'un condensateur à travers un résistor



Que va-t-il se passer si on ferme l'interrupteur ?

Et bien Le condensateur va commencer à se charger rien de plus.



Mais alors, qu'est-ce que le montage fait de plus par rapport au précédent ?

Il va nous permettre de voir l'invisible ! 

En fait, le résistor va "amplifier" une propriété du condensateur, pour nous permettre de voir un phénomène très intéressant et impossible à détecter avec le précédent montage. Ce phénomène est le **temps de charge** du condensateur.

Le principal but du résistor étant de limiter la vitesse du courant, donc la vitesse de déplacement des charges électriques, il va donc agir sur la vitesse à laquelle les charges du condensateur vont se ranger dans les armatures de ce dernier. Par conséquent, le condensateur se charge plus lentement.

En bref, la charge n'est plus instantanée, mais dure un certain temps avant d'atteindre sa valeur finale (de saturation) qui est quasiment égale à la tension du générateur.

### Évolution de la charge du condensateur

Si nous regardons de plus près le chronogramme de la charge du condensateur, nous obtenons ceci :

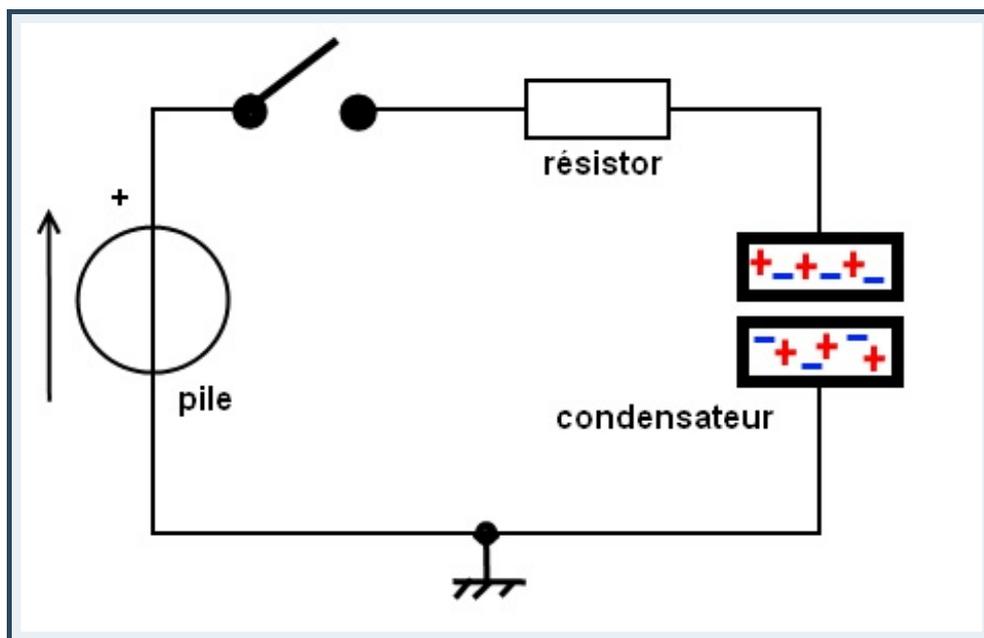


Figure 7 : Charge d'un condensateur au travers d'un résistor

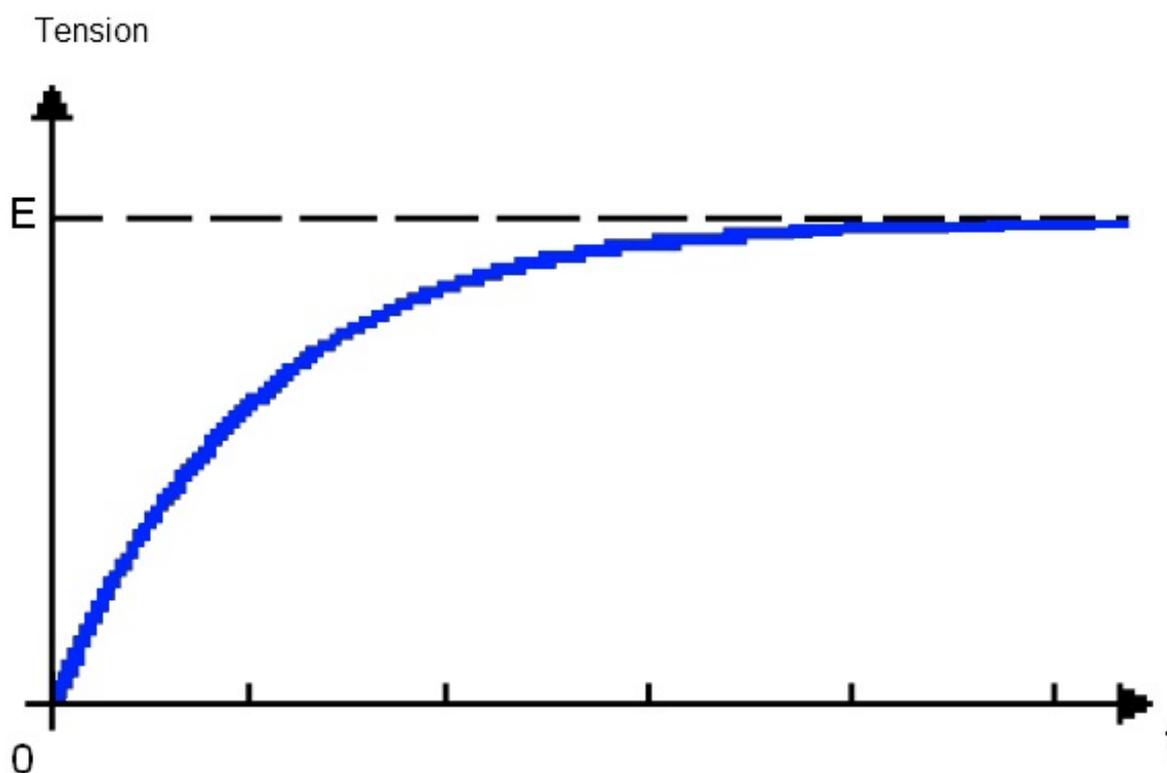


Figure 8 : Charge d'un condensateur à travers une résistance (résistor, ou autre type d'élément résistif)

Ce que l'on observe sur l'image : la tension **E** (axe des ordonnées) est la tension à laquelle on charge le condensateur. Cette charge se fait en fonction du temps **t** (axe des abscisses). La courbe en **bleu** est la courbe d'évolution de la tension aux bornes du condensateur. Cette évolution se fait de façon **exponentielle**. Et c'est ce phénomène que nous cherchions à observer.



La charge d'un condensateur à travers une résistance **n'est pas** exponentielle, mais **a la forme** d'une exponentielle. C'est très important de ne pas confondre ça !

### Constante de charge

Maintenant que le condensateur est chargé à travers une résistance, on peut observer son phénomène de charge "lente". Mais savez-vous que l'on peut calculer ce temps de charge ? Oui, le temps de charge du condensateur à travers une résistance est régi par une formule toute simple que voici :

$$\tau = R * C$$

Avec :

- $\tau$  : (prononcez "tau" pensez à Homère Simpson 😊) temps de charge du condensateur à travers une résistance, en seconde (noté **s**)
- **R** : résistance à travers laquelle se charge le condensateur, en Ohm (noté  $\Omega$ )
- **C** : capacité du condensateur, en Farad (noté **F**)

Alors, on distingue plusieurs moments lors de la charge du condensateur. Plus précisément, il y en a deux importants :

- A  $\tau$ , le condensateur est chargé à 63% de la tension qui lui est appliquée pour sa charge
- A  $3\tau$ , on considère que le condensateur est complètement chargé à la tension de charge, bien que ce ne soit pas totalement le cas puisqu'il est chargé à 95%

- On peut aussi rajouter  $5\tau$  où le condensateur est chargé à 99%



Un condensateur en charge avec ou sans résistance de charge **ne sera jamais chargé complètement**, en théorie. Ceci est dû à la charge qui se fait de façon exponentielle. En pratique, je le disais, on le considère chargé à  $5\tau$ . Sur le précédent chronogramme, la tension  $E$  est l'**asymptote** vers laquelle tend la tension aux bornes du condensateur.

Plus généralement, le taux de charge d'un condensateur se calcule comme ceci :

- A  $\tau$ , la tension aux bornes du condensateur est de  $U_c = 0,63E$  ( $E$  étant la tension d'alimentation)
- A  $3\tau$ ,  $U_c = 0,95E$
- A  $5\tau$ ,  $U_c = 0,99E$



Qu'en est-il du courant ?

Et bien le courant varie de la même façon que la tension, d'après la loi d'ohm. On peut ajouter que le courant est très intense lors du début de la charge d'un condensateur déchargé. Et de même lors de sa décharge. C'est une propriété du condensateur se comportant comme un court-circuit dans ces deux cas.

### Décharge

La décharge du condensateur ne peut se faire que si un récepteur est branché à ses bornes ; dans notre cas se sera une résistance.

Ainsi la charge accumulée dans le condensateur sera restituée. Évidemment cette décharge n'est pas instantanée mais dure un certain temps (plus ou moins long suivant la charge cumulée), voici l'allure de cette décharge :

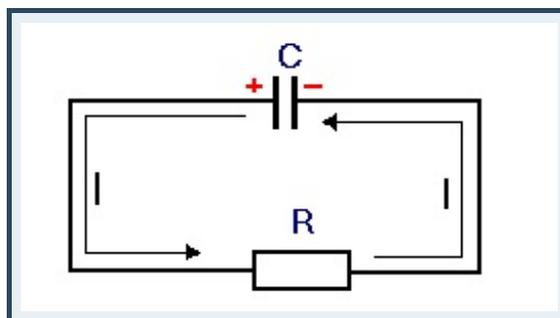


Figure 9 : Décharge d'un condensateur à travers une résistance

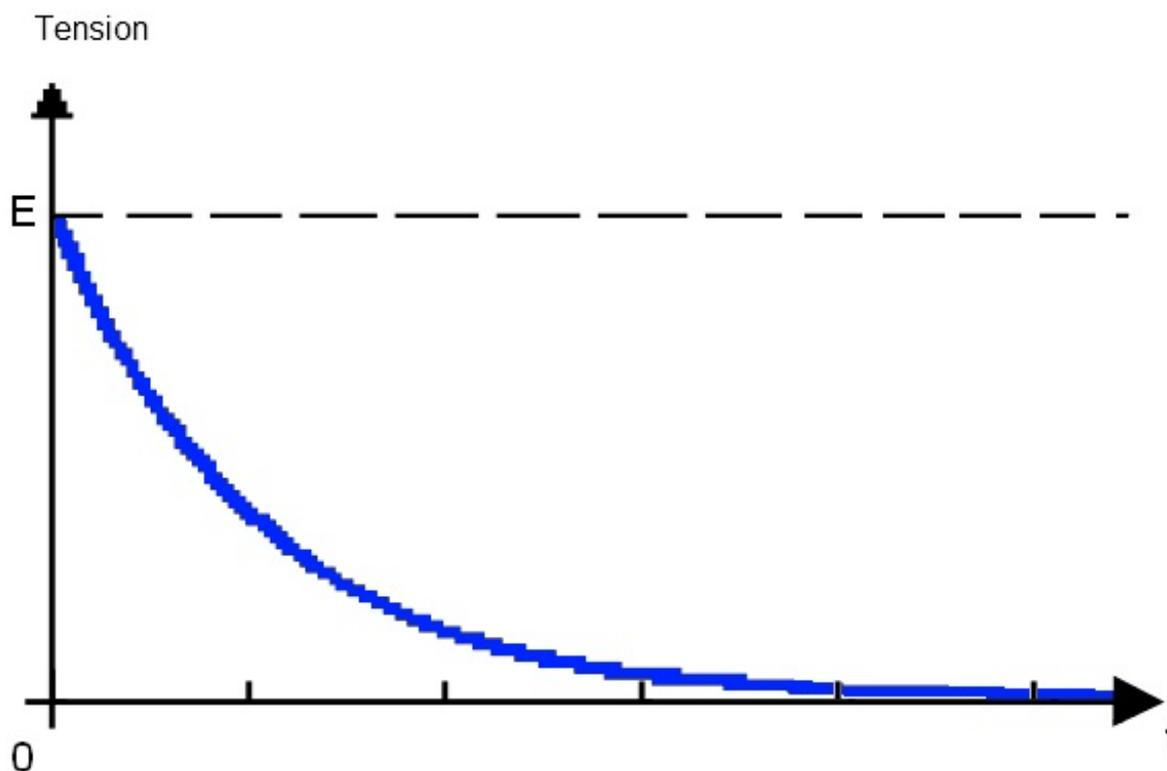


Figure 10 : Décharge d'un condensateur à travers une résistance

La décharge du condensateur se comporte de façon opposée à sa charge. On peut également utiliser la formule  $\tau = R * C$ . Cependant, les valeurs en pourcentage sont différentes :

- A  $\tau$ , le condensateur est déchargé à 63% de la tension à ses bornes
- A  $3\tau$ , on considère que le condensateur est complètement déchargé ; il ne lui reste que 5% de sa charge initiale
- On peut aussi rajouter  $5\tau$  où le condensateur est déchargé à 99%



Un petit programme de simulation en ligne est disponible sur [ce site internet](#) ; il vous permettra d'observer la charge et la décharge d'un condensateur en temps non réel. Vous pourrez ainsi observer les courbes aux allures exponentielles de la charge et de la décharge d'un condensateur.

Plus généralement, le taux de décharge d'un condensateur se calcule comme ceci :

- A  $\tau, U_c = 0,37E$
- A  $3\tau, U_c = 0,05E$
- A  $5\tau, U_c = 0,01E$

En conclusion, voici une image récapitulative :

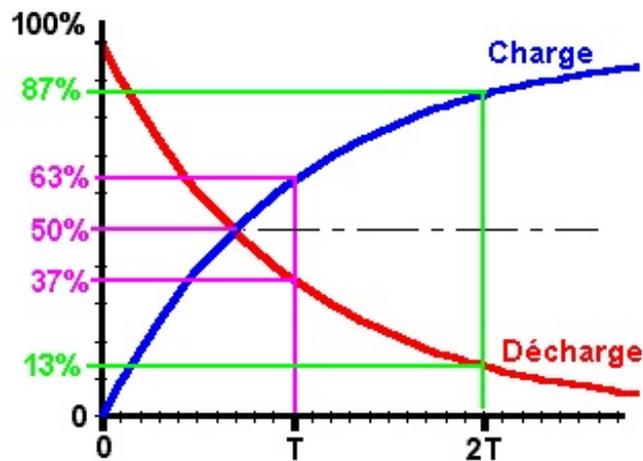


Figure 11 : Récapitulatif du taux de charge d'un condensateur

### Propriété conclusive

En conclusion, vous voyez donc que le condensateur ne réagit pas instantanément aux changements brusques de tension. C'est un phénomène très intéressant, que nous aurons la possibilité de discuter plus loin dans ce cours, notamment dans les applications antiparasites.

### Quelques exercices d'application

Et pour finir en beauté, je vous offre la possibilité de faire deux exercices :

#### Exercice 1 :

Un condensateur  $C$  de capacité  $100\ \mu\text{F}$ , chargé initialement à  $100\%$ , est branché à une résistance en parallèle. Calculez la valeur de la résistance pour que la décharge à  $37\%$  dure  $10\text{ms}$ .

**Secret** (cliquez pour afficher)

Les résultats :

On sait que le temps de décharge à  $37\%$  est donné par la relation  $T = R * C$   
Donc si nous cherchons  $R$ , on écrit :  $R = T/C$  donc  $R = 100\ \Omega$

#### Exercice 2 :

Un condensateur  $C$  de  $100\ \mu\text{F}$  est en train de se charger à travers une résistance  $R$  de  $200\ \Omega$  et un générateur de tension continue à  $10\text{V}$ , on voudrait connaître le temps nécessaire pour charger le condensateur à  $87\%$ . Calculez ce temps de charge.

**Secret** (cliquez pour afficher)

Les résultats :

On sait que le temps de charge à  $87\%$  est égal à  $2 * T$ , selon la courbe, or  $T = R * C$   
Donc :  $Le\ Temps\ de\ Charge = 2 * R * C$  donc  $Le\ Temps\ de\ Charge = 40\ \text{ms}$ .

### Calcul de la charge accumulée

Comme nous l'avons évoqué au début de ce chapitre, un condensateur se comporte également en accumulateur de charges électriques. C'est-à-dire, qu'il va emmagasiner une quantité de charges pendant qu'il est soumis à une différence de potentiel, arrivé à un niveau il sature et donc sa charge s'arrête; ce temps de charge et cette quantité de charges cumulée sont donc naturellement dépendants de la capacité du condensateur et de la tension à ses bornes. Tout comme un réservoir, le temps de

remplissage dépend du volume de ce dernier et du débit de remplissage et réciproquement pour la vidange.

### Charge emmagasinée

Cette charge est fonction de la tension à laquelle le condensateur est soumis et à sa capacité. Elle est régie et calculable par la relation :

$$Q = C * U$$

Où :

- $Q$  : La charge en Coulombs (symbole C).
- $C$  : La capacité en Farads (symbole F).
- $U$  : La tension aux bornes du condensateur en Volts (symbole V).



On utilisera pas souvent cette formule, mais il est bien pour votre culture que vous la connaissiez. 😊

### Les associations

Comme tous dipôles, le condensateur peut être associé à des congénères. Ainsi, les capacités se modifient, mais voyons comment...

### Association parallèle

Il s'agit de la même disposition que pour les résistances, voyez un peu :

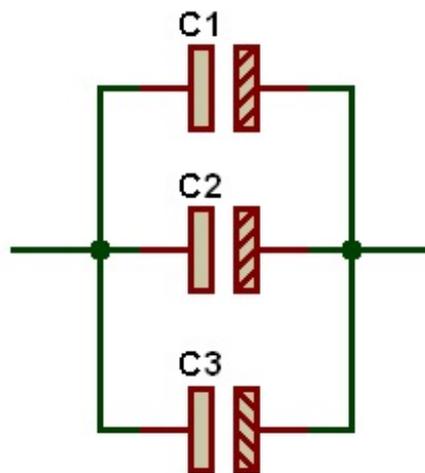


Figure 12 : condensateurs en association parallèle

Cependant, les capacités des condensateurs en parallèle ne diminuent pas, mais augmentent !

### Formule

La formule qui permet de calculer la capacité globale créée par l'association de condensateurs en parallèle est aussi simple que cela :

$$C_{equivalente} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

On additionne simplement les valeurs des capacités des condensateurs entre elles.

## Association série

L'association série des condensateurs nous offre deux avantages. Le premier est de diminuer la capacité totale des condensateurs en série. Le deuxième, c'est d'augmenter **la tension de service** du condensateur équivalent.

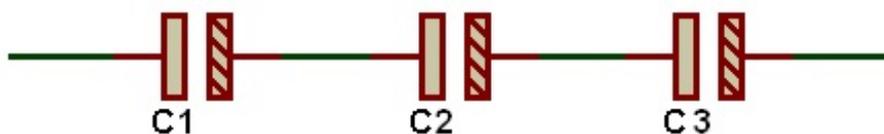


Figure 13 : condensateurs en association série

### Formule

La formule des condensateurs montés en série est un peu plus barbare, si j'ose dire, que la précédente :

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

Par exemple, si on branche en série deux condensateurs de même valeur capacitive, alors leur capacité totale est divisée par deux. Et si ces mêmes condensateurs ont chacun une tension de service de 50V, alors la tension de service totale sera de 100V.

L'association série de deux condensateurs de même valeur entraîne une capacité totale de la moitié d'une seule des deux capacités mise en série. Par exemple,  $C_1 = C_2$ , alors la capacité équivalente est :

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{1}{\frac{C_2}{C_1 * C_2} + \frac{C_1}{C_2 * C_1}}$$

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{1}{\frac{C_1 + C_2}{C_1 * C_2}}$$

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}$$

Or  $C_1 = C_2$ , donc :

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{C_1 * C_1}{C_1 + C_1}$$

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{C_1 * C_1}{2 * C_1}$$

$$C_{\text{equivalente}} = \frac{C_1}{2}$$

$$C_{\text{équivalente}} = \frac{C_1}{2} = \frac{C_2}{2}$$



Je répète, cette formule n'est applicable que pour **deux condensateurs en série de même valeur !**

## Exercice

Aller, un peu d'exercice vous fera le plus grand bien ! 😊

Avec le schéma suivant :

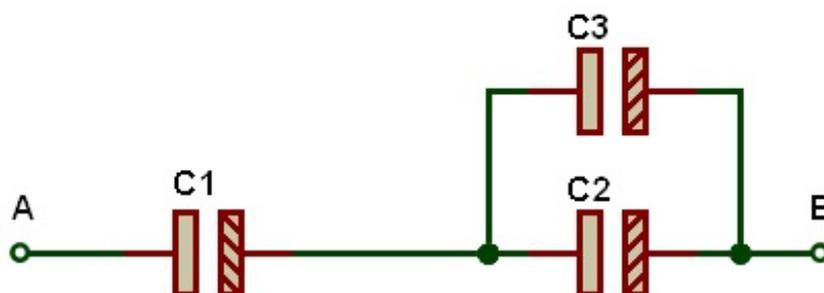


Figure 14 : association diverse de condensateurs

Calculez la valeur totale du condensateur équivalent entre les points A et B :



Figure 15 : montage précédent sous sa forme équivalente

Données numériques :  $C_1 = 10\mu F$  ;  $C_2 = 0,1nF$  et  $C_3 = 0,1nF$  .

**Secret** (cliquez pour afficher)

Réponse :

En premier lieu, on calcul la capacité équivalente de  $C_2$  et  $C_3$  :

$$C_{eq1} = C_1 + C_2$$

$$C_{eq1} = 0,1 + 0,1$$

$$C_{eq1} = 0,2nF$$



Ce sont bien des nanoFarads !

On se retrouve avec le schéma suivant :

Figure 16 : condensateurs  $C_1$  et  $C_{eq1}$  en série

Enfin, pour terminer, on calcule la capacité globale grâce à la loi des association de condensateur en série :

$$C_{equivalente} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{eq1}}}$$

$$C_{equivalente} = \frac{1}{\frac{1}{10 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{0,2 \cdot 10^{-9}}}$$

$$C_{equivalente} = 0,199 nF$$

Nous avons donc trouvé une capacité totale de :  $C_{equivalente} = 0,199 nF$ .

Tous ça pour vous montrer que lorsque l'on met des condensateur en série, leur capacité totale chute de vraiment beaucoup !

## Technologies



Cette sous-partie n'est pas nécessaire à la compréhension du cours, c'est un complément sur les différentes technologies des condensateurs. Vous pourrez trouver des informations utiles si vous avez besoin de savoir quel condensateur utiliser pour vos montages électroniques. 😊

Les condensateurs ont des technologies très variées et s'utilisent en fonction de leur technologie. Nous allons voir ces différentes technologies et dans quel type de montage on les utilise. Mais avant, regardons quelques propriétés intéressantes du condensateur.

## Plus de propriétés !

### Capacité et claquage

Si nous regardons la figure 3 (représentant la constitution d'un condensateur) les tailles sont volontairement exagérées; il y a tout intérêt à prendre une épaisseur très faible pour le diélectrique afin d'obtenir une plus grande capacité avec des dimensions géométriques petites. En contrepartie, le condensateur ne pourra plus supporter de grandes tensions à ses bornes. Voilà une belle occasion pour parler du phénomène de claquage sans que cela vous pousse à vous demander pourquoi on en parle 😊.

Le claquage est le passage de l'état isolant à l'état conducteur du diélectrique.

Tout isolant a une capacité d'assurer l'isolation mais jusqu'à une certaine limite; cette limite est donnée sous la forme d'une tension, cette tension est appelée tension de claquage.

Autrement dit, si vous prenez un morceau fin en plastique, et que vous le mettiez entre les deux bornes d'un générateur de tension variable, et que vous augmentiez cette tension petit à petit, arrivé à une certaine valeur de cette tension l'isolant commence à perdre sa propriété isolante jusqu'à devenir "conducteur", là très probablement vous allez court-circuiter le générateur. C'est ce qu'on appelle un claquage.



Attention ne faites pas cette expérience chez vous, car elle demande beaucoup de précautions sécuritaires et de connaissances.

Dans le cas d'un condensateur, ce phénomène entraîne l'apparition d'un arc électrique, souvent suivi d'une détérioration du composant.

Revenons maintenant à notre sujet 😊. La recherche dans le domaine des technologies de fabrication des condensateurs se

limite à trouver des compromis entre les dimensions du composant, sa capacité et sa tension de claquage.

Analysons l'équation (simplifiée) qui lie ses paramètres, à savoir :

$$C = \epsilon * \frac{S}{e}$$

- $C$  : La capacité du condensateur en Farads (F)
- $S$  : la surface des armatures en mètres carrés (m<sup>2</sup>)
- $e$  : l'épaisseur du diélectrique en mètres (m)
- $\epsilon$  : (prononcée "epsilon") permittivité de l'isolant (grandeur liée à la nature physique de l'isolant) - pas d'unité

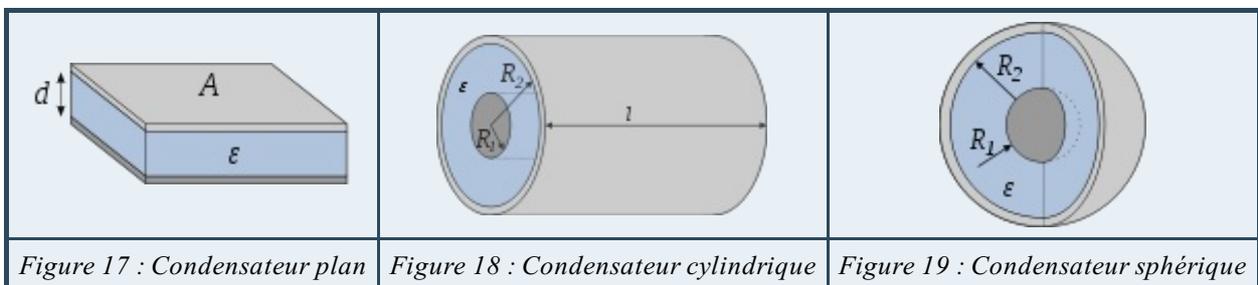
Plus la surface des armatures est grande, plus la capacité du condensateur est grande aussi, mais il ne faut pas oublier la contrainte des dimensions géométriques du composant; car ceci peut s'avérer gênant dans certains domaines où les composants doivent être relativement petits.

Plus l'épaisseur (e) entre les armatures est petite, plus la capacité est grande. Mais en contrepartie, la tension de claquage sera plus petite.

Maintenant vous comprenez un peu mieux l'histoire du compromis dont nous avons parlé quelques lignes plus haut 😊.

### Les familles de condensateurs

Il existe bien évidemment plusieurs technologies de fabrication généralement suivant l'un des trois modèles de condensateurs suivants :



Je vous épargnerai les détails liés aux fabrications et aux différents procédés chimiques de l'obtention d'un condensateur. Toutefois, au risque de me répéter, le plus important à savoir est que ce sont les performances de l'isolant (diélectrique) qui permettent de classer les condensateurs.

### Les pertes dans le condensateur

En électronique, tout composant possède ce qu'on appelle un modèle parfait et un modèle réel.

Le modèle parfait ignore toutes imperfections et défauts du composant, cela ne concerne pas seulement le condensateur mais n'importe quel composant électronique (et électrique en général).

Dans le cas du condensateur, ce modèle parfait correspond à une capacité seule. On suppose donc que si le condensateur s'est chargé, il ne se déchargera JAMAIS, autrement dit, il conservera sa charge infiniment dans le temps tant qu'il n'est pas branché (si on branche une résistance à ses bornes il se déchargera presque instantanément bien sûr). Il suppose également que le condensateur se comporte de la même manière quelque soit la fréquence et la tension à laquelle il est soumis.

Le modèle dit "réel" est ce qui se passe en réalité. La différence entre le modèle réel et le modèle idéal (ou parfait) peut s'avérer négligeable suivant le domaine.

Pour le condensateur le modèle réel admis de tout le monde (ou presque 😊) est le suivant :

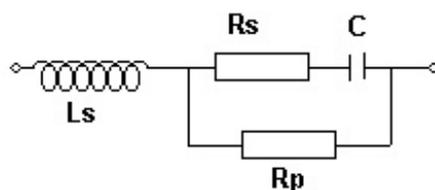


Figure 20 : Modèle réel d'un condensateur

Où :

- **C** : Est la capacité du condensateur.
- **Rp** : Est la résistance responsable du déchargement du condensateur dans le temps (concrètement, il s'agit des imperfections liées au diélectrique).
- **Rs** : Est la résistance des connexions, elle modélise une perte de puissance quand le condensateur est en train de se charger ou de se décharger. Cette perte est sous la forme de ce qu'on appelle l'effet Joule, il s'agit ni plus ni moins que d'une énergie sous forme de chaleur. Autrement dit notre composant chauffe.
- **Ls** : Cette bobine (inductance) modélise les comportements des connexions dans les domaines de l'hyperfréquence. Admettez le pour l'instant 🤔.

Il va de soi de rappeler que tous ces paramètres sont liés à la technologie et aux procédés de fabrication du condensateur.

## Les condensateurs non polarisés

Ce sont des condensateurs dont le sens de branchement dans un circuit importe peu. Chacune de ces deux bornes peut être reliée à une tension positive ou négative.

### Les condensateurs polyester

Ce sont les plus courants des condensateurs à diélectrique plastique métallisé. Le plastique est donc un polyester. On réserve ces condensateurs pour des usages ne demandant pas une grande précision. Voici quelques caractéristiques :

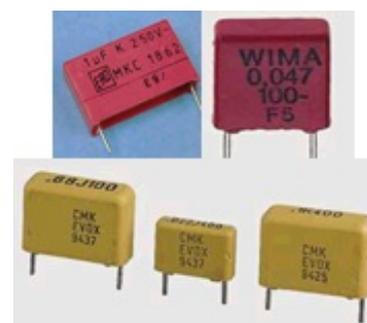
- Valeur nominale : de 1nF à 250μF.
- Tolérance : de 1% à 20%.
- Tension de service : de 40V à 10000V.
- Résistance d'isolement : de 10<sup>9</sup> à 10<sup>12</sup> ohms.
- Utilisation : - condensateurs de liaison et de découplage, circuit antiparasites.



### Les condensateurs polycarbonate

Le diélectrique plastique est un polycarbonate. Ce diélectrique a un excellent coefficient de température. Il permet de fabriquer des composants de grande précision et stabilité. Il possède en outre une forte résistance d'isolement. Ils sont plutôt rares.

- Valeur nominale : de 1nF à 250μF.
- Tolérance : de 1% à 2%.
- Tension de service : de 40V à 5000V.
- Résistance d'isolement : supérieure à 10<sup>12</sup> ohms.
- Condensateurs très stables, très fiables.
- Utilisation : - circuit d'accord, - filtres, intégrateurs, dérivateurs, - circuits antiparasites.



### Les condensateurs polypropylène

Ils ont une très bonne stabilité en fréquence et un excellent comportement en régime impulsionnel.

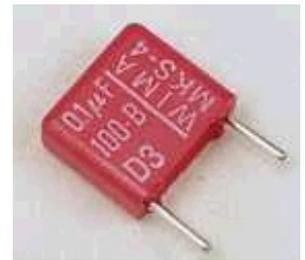
Ils sont entre autres utilisés pour faire des condensateurs de précision.

- Valeur nominale : de 0,1nF à 250 $\mu$ F.
- Tolérance : de 10% à 20%.
- Tension de service : de 160V à 3500V.
- Résistance série très faible.
- Utilisation pour des circuits en régimes impulsionnels, alimentation à découpages.



### Les condensateurs polystyrène

Ils sont très appréciés pour leur très grande stabilité et sont utilisés essentiellement à haute température (155°C). Leur comportement en régime impulsionnel est excellent.



### Condensateurs à céramiques Stéatite

La céramique utilisée est de la Stéatite, du bioxyde de titane ou du strontium.

Le diélectrique se présente sous forme de tube ou de perle. Les armatures sont obtenues par argenture des 2 faces de la céramique. Les sorties sont soudées sur l'argenture. La protection est faite par vernis, émail ou vitrification. Ils sont précis et stables.



- Valeur nominale : de 1pF à 2nF.
- Tolérance : de 2% à 20%.
- Tension de service : de 25V à 1000V.
- Résistance d'isolement : de 10<sup>11</sup> ohms.
- Utilisation en fréquence : de 20kHz à 50MHz.
- Utilisation en HF pour les circuits d'accord (recherche de stations radio), les circuits de liaison.

### Condensateurs à céramiques Baryum

La céramique est cette fois-ci du titane de baryum. Ils sont peu stables et peu précis.

- Valeur nominale : de 100pF à 0,47 $\mu$ F.
- Tolérance : de 20% à 50%.
- Tension de service : de 25V à 1000V.
- Résistance d'isolement : 10<sup>9</sup> ohms.
- Utilisation en fréquence : de 50Hz à 50MHz.
- Utilisation : les circuits de liaison et de découplage.



### Condensateurs à électrolytes chimiques (polarisés).

Ces condensateurs sont fabriqués essentiellement pour leur forte capacité qui peut atteindre le Farad ! Bien évidemment, plus leur capacité est grande, plus



leur prix également.



Ces condensateurs ont un sens de branchement ! Ils ont une borne **positive** et une borne **négative**. Le fait de brancher un condensateur polarisé à l'envers peut le faire exploser !! Alors attention !



Pour votre information personnelle, sachez que la principale cause de la mort d'un appareil électronique provient des condensateurs polarisés. En effet, ils vieillissent souvent mal et ont tendance à mourir en s'ouvrant et laissent s'échapper le liquide qu'ils contiennent. Souvent il suffit de les changer pour réparer l'appareil en question, mais parfois cela ne suffit pas.

### Symbole

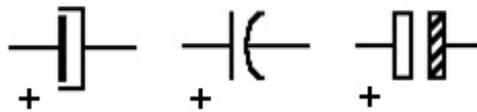


Figure 21 : Symboles pour condensateurs chimiques polarisés

### Condensateur aluminium à électrolyte liquide

Le diélectrique est composé d'alumine, plongé dans de l'acide "borique". L'électrode et la cathode sont composées d'aluminium.

- Valeur nominale : de  $1\mu\text{F}$  à  $150000\mu\text{F}$ .
- Tolérance : de 10% à 20%.
- Tension de service : - miniature de 2,5V à 63V, - ordinaire de 150V à 550V.
- Courant de fuite : de quelques microAmpères.
- Limite en fréquence : inférieure à 10kHz.
- Utilisation : - Filtrage, découplage en Basse fréquence, résistance série très bonne.
- Avantage : Faible volume pour une grande capacité.

### Condensateur tantale à électrolyte gélifié

L'anode est une pastille de poudre de tantale pressée et frittée. La cathode est composée du boîtier en argent. L'électrolyte est à base d'acide sulfurique

- Valeur nominale : de  $1\mu\text{F}$  à  $1000\mu\text{F}$ .
- Tolérance : de 10% à 20%.
- Tension de service : - 6V à 150V.
- Courant de fuite : de 1 microAmpère.
- Limite en fréquence : inférieure à 10kHz.
- Utilisation : - Filtrage, découplage en Basse fréquence.
- Inconvénient : Utilisés que pour de faible valeur de tension de service.

### Condensateur aluminium à électrolyte solide

L'anode est en aluminium. La cathode est composée de l'électrolyte solide. Ils sont très stables en température. Le courant de fuite est inférieur au microAmpère, le stockage d'énergie sera prolongé. Les courants de charge et de décharge sont sans limitation.

Utilisation : Découplage, filtrage en basse fréquence.

Remarque : La durée de vie, la fiabilité et l'étendue de la gamme de température sont importantes.

- Valeur nominale : de 10nF à 500μF.
- Tolérance : de 10% à 20%.
- Tension de service : - 2V à 125V.
- Courant de fuite : de 1 microAmpère.
- Utilisation : - Filtrage, découplage en Basse fréquence.
- Inconvénient : Résistance série élevée.
- Avantage : - Longue durée de vie. - Il occupe un volume plus faible que l'aluminium. Ils sont stables dans le temps. Cette fiabilité peut être altérée par l'influence combinée du courant, de la tension et de la température qui provoquent la naissance d'un oxyde de tantale.

## Les condensateurs variables

Ce sont des condensateurs qui ont la particularité d'avoir une capacité variable. On la modifie grâce à un curseur. Le diélectrique qui les compose est à air ou à diélectrique plastique.

Principe : On déplace une des armatures du condensateur par rapport à l'autre. La distance entre les deux armatures est donc modifiée, la capacité aussi (voir la formule du condensateur plan).

On utilise principalement ce type de condensateur pour les circuits d'accord AM et FM et plus généralement en électronique Haute Fréquence.

### Symbole

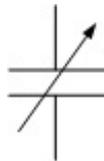
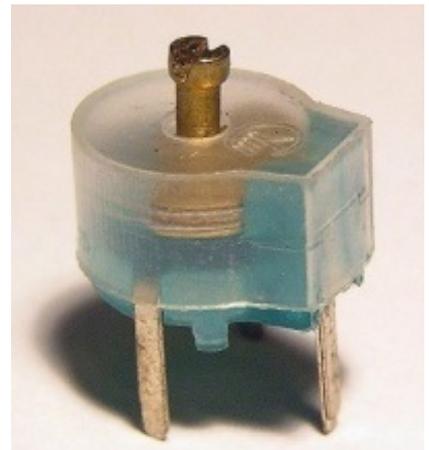


Figure 22 : Capacité variable



Ces condensateurs n'offrent guère une capacité au-delà de quelques dizaines de pico-Farads.

Pour terminer notre étude du condensateur en régime continu, je vous propose de boucler ce chapitre par une petite conclusion qui récapitule les points importants que l'on vient de voir.

- Avec un condensateur, on peut introduire la notion de temps dans un circuit à cause de sa charge et de sa décharge qui sont lentes lorsqu'elles se produisent via une résistance.
- On peut également stocker de l'énergie dans un condensateur. On s'en servira parfois de mémoire ou de tampon.
- Enfin, il y a assez de technologies qui vous permettront de réaliser tout vos montages !

Vous croyez tout savoir sur le condensateur ? Que né-ni ! Nous n'avons pas encore vu comment fonctionnait le condensateur en régime alternatif et sommes loin d'avoir vu tous les champs d'application dans lesquels il opère !

Place au chapitre suivant ! 🤖

## La bobine

La bobine, bien qu'étant relativement facile à fabriquer, possède des propriétés étonnantes.

Je vous recommande de relire le chapitre sur les condensateurs si tout n'y était pas clair pour vous : condensateurs et bobines se ressemblent, moyennant quelques analogies.



En électricité, le terme "bobine" peut en réalité désigner deux dispositifs :

- un dipôle électrique ;
- un dispositif destiné à produire des tensions élevées.

Dans cette partie, je me limiterai au dipôle.

Sachez d'ores et déjà que vous lirez souvent les mots "magnétisme" ou "électromagnétisme" car les propriétés physiques de la bobine découlent de cette branche de la physique. Mais rassurez-vous, c'est trop compliqué pour notre propos et nous ne n'y attarderons pas.

### Généralités

#### Qu'est ce qu'une bobine ?

Imaginez une bobine de fil de couture :



Eh bien, en électronique, une bobine, c'est pareil, sauf qu'à la place d'un fil de coton, c'est un fil conducteur.



C'est tout ?

A peu près. Mais soyons un peu plus rigoureux :

*Une bobine est un dipôle passif non polarisé constitué d'une à une multitude de **spires** de fil conducteur autour d'un **noyau**.*

Le nombre de spires, le matériau (air, bakélite, fer...) et la forme (rectiligne, en U, fermée) du noyau influenceront sur les propriétés de la bobine. Nous y reviendrons plus loin.

### A quoi ça ressemble ?

Comme pour les autres composants, on en trouve de différentes tailles, de différentes formes.

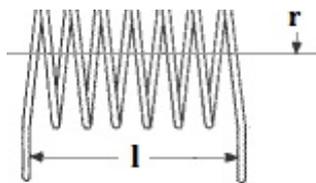
Voici quelques exemples :



De gauche à droite : une bobine rectiligne, une bobine circulaire et une bobine moulée.

Suivant la forme de la bobine, différents noms peuvent lui être donnés.





- Si la longueur  $l$  est petite devant son rayon  $r$ , la bobine est dite **plate**.
- Si  $l$  est voisin de  $r$ , la bobine est appelée **solénoïde**.

## Symbole

Pour représenter ce composant dans un schéma électronique, rien de plus facile : il suffit de dessiner des ponts (ou enjambements) comme quand vous étiez petits à la maternelle !



*Symbole générique de la bobine*

Il existe d'autres symboles pour certaines bobines spécifiques :



*Bobine à noyau de ferrite*



*Bobine à noyau de fer doux*



*Bobine ajustable*

## Où est-ce qu'on en trouve ?

Les bobines sont très utiles, dans de nombreux domaines.

Les bobines, associées avec une résistance et/ou un condensateur, sont notamment très utilisées en filtrage. Si vous démontez votre amplificateur audio ou vos enceintes, il y a fort à parier que vous trouverez des bobines.

En outre, la bobine présente des propriétés électromagnétiques. Associée à une autre bobine ou à des aimants, elle va pouvoir servir de transformateur de tension, de mécanisme de moteur, ou encore de micro de guitare électrique !

Dans la suite du cours, je vous expliquerai comment elle peut être utilisée en filtrage. En revanche, les phénomènes électromagnétiques en jeu dans mes derniers exemples sont complexes et je ne les aborderai que succinctement à la fin du chapitre.

### Influence d'une bobine dans un circuit

Avant de vous présenter en détail les caractéristiques d'une bobine, je voudrais vous donner une idée de ce à quoi un tel composant peut servir, grâce à un exemple très simple.

Effectuons un petit montage :

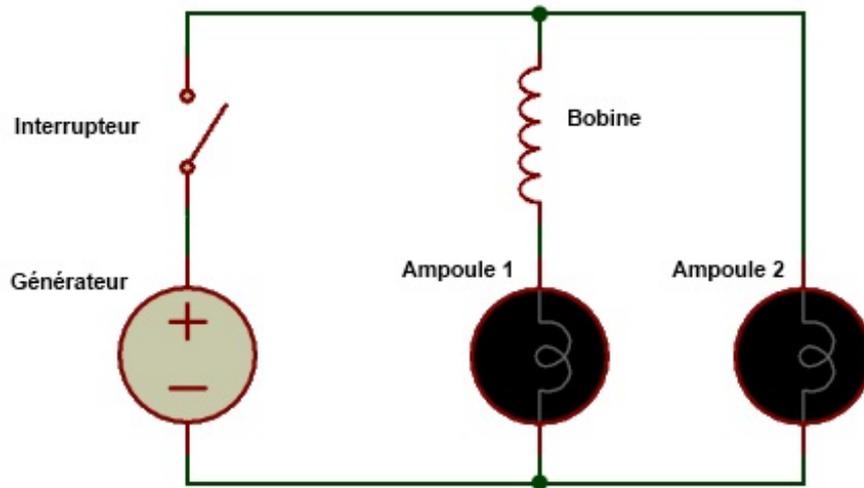


Figure 1 : montage initial

A un instant  $t_0$ , on ferme l'interrupteur. Immédiatement, la lampe 2 s'allume. Par contre, on remarque que la lampe 1 ne s'allume pas.

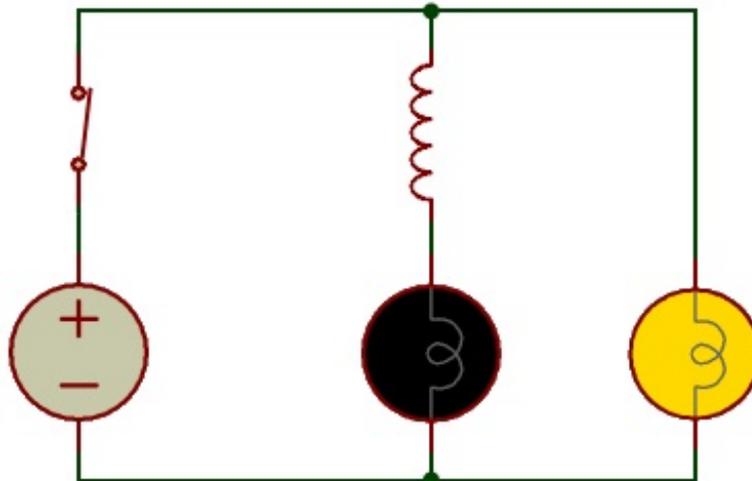


Figure 2 : montage au temps  $t_0$

Quelques instants plus tard, à l'instant  $t_1$ , la lampe 1 s'allume à son tour.

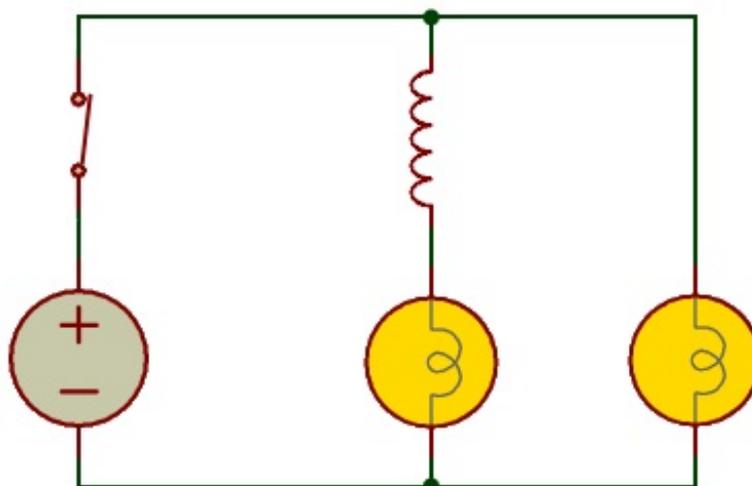


Figure 3 : montage au temps  $t_1$

Que s'est-il passé ? Étudions le processus pas à pas :

- - avant  $t_0$ , l'interrupteur est ouvert. Aucun courant ne circule dans le circuit.
- - à  $t_0$ , l'interrupteur est fermé. Un courant s'établit immédiatement dans la lampe 2 qui s'allume. On constate en revanche que la lampe 1 ne s'allume pas : aucun courant ne s'y est encore établi (plus exactement, le courant y est nul).
- - à  $t_1$ , la lampe 2 s'allume enfin. Un courant la parcourt donc.

**Bilan : la bobine s'est opposée transitoirement (i.e : temporairement) à l'établissement du courant. Une fois le courant établi, la bobine se comporte comme un fil.**

J'espère que ce petit exemple vous permet de voir quelle peut être l'influence d'une bobine dans un circuit : elle s'oppose à l'établissement (ou à l'annulation) du courant, tout comme le condensateur s'oppose à l'établissement (ou à l'annulation) d'une tension.

Ainsi, l'intensité du courant électrique dans un circuit comportant une bobine ne subit pas de discontinuité : le courant s'établit de façon progressive et s'annule de la même façon ; l'intensité du courant électrique ne peut pas passer de façon instantanée de la valeur zéro à une valeur  $I$  non nulle.

## Propriétés d'une bobine

### L'inductance

Comme le condensateur, la bobine a la capacité d'emmagasiner de l'énergie. Cette caractéristique est appelée **inductance**, est représentée par la lettre **L** et s'exprime en Henry (H).

Ordres de grandeur du Henry

Nom	Symbole	Puissance de 10	Commentaires
Henry	H	$10^0$	Rarement utilisé
milli Henry	mH	$10^{-3}$	Très utilisé
micro Henry	$\mu$ H	$10^{-6}$	Très utilisé

On utilise néanmoins plus souvent le milli-Henry, en effet car la taille d'une bobine est proportionnelle à sa grandeur en Henry. En règle générale, une bobine de plusieurs Henry sera très grosse. Mais surtout, les bobines de forte valeur sont plutôt utilisées en électronique de puissance. Nous, nous n'aurons affaire qu'avec des bobines de petites tailles et de petites valeurs, propre à l'électronique de signal.



**Joseph Henry** (qui donne à l'inductance son unité) est un physicien américain du 19<sup>ème</sup> siècle, qui travailla essentiellement sur l'électromagnétisme. Il perfectionna les électroaimants, inventa un télégraphe électromagnétique et conçut l'un des premiers moteurs magnétiques.

### Une brève histoire de temps

Revenons un instant sur l'établissement du courant dans notre ampoule.

L'observation du courant dans la branche bobine+ampoule est de la forme :

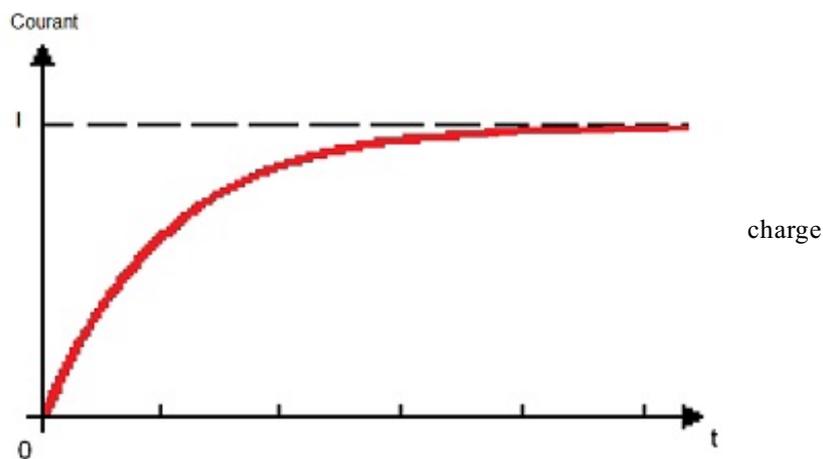


Figure 4 : charge du courant dans une bobine à travers une résistance

Si à présent, on ouvre l'interrupteur, la lampe s'éteindra progressivement, et le courant sera de la forme :

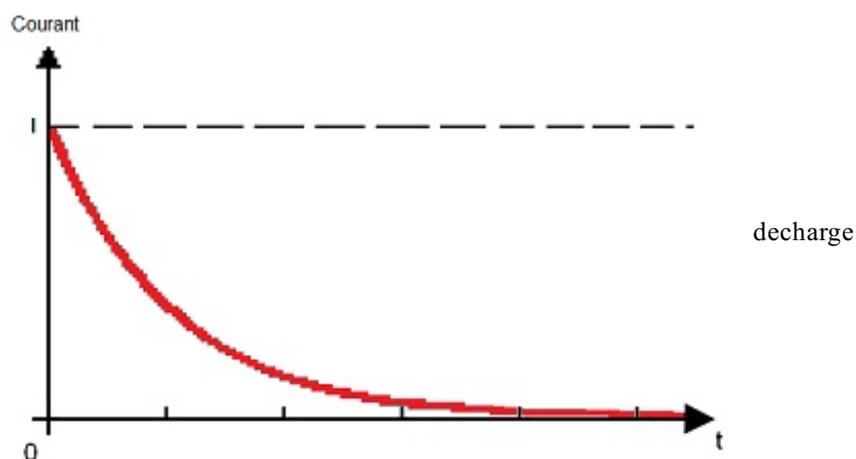


Figure 5 : décharge du courant dans une bobine à travers une résistance



J'ai déjà vu ça quelque part !

Et oui ! Dans le chapitre sur le condensateur. Je vous l'ai dit : il y avait des grandes ressemblances entre les 2 composants, moyennant quelques analogies (tension ↔ courant, capacité ↔ inductance). Et comme pour le condensateur, il est possible de définir une constante de temps pour la bobine :

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Cette constante de temps suit les mêmes comportements que pour le condensateur, souvenez-vous :

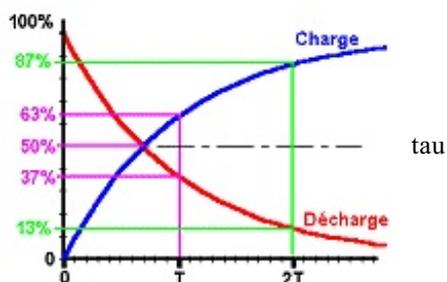


Figure 6 : taux de charge et de décharge d'une bobine

(Comment ça "Fainéant, t'utilises les mêmes images !" ? Je ne vois pas ce que vous voulez dire... 🤔)

### Calcul d'inductance

L'inductance de la bobine est une constante positive qui ne dépend que des caractéristiques géométriques de la bobine. Toutefois, il n'existe aucune formule fiable pour le calcul de l'inductance des bobines : chacune est le fruit d'approximations et a donc ses limites.

Je vous fournis néanmoins la formule la plus courante, pour une bobine de longueur  $l$ , qui possède  $N$  spires de surface de section  $S$  :

$$L = \mu \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S$$

Avec :

- $L$  : inductance de la bobine en Henry (H)
- $N$  : nombre de spires de la bobine
- $l$  : longueur de la bobine (et non pas du fil qui la compose) en mètres (m)
- $S$  : section de la bobine (de son fil, ici) en mètres carrés (m<sup>2</sup>)



C'est quoi ce paramètre  $\mu$  ?

Très bonne question. Il s'agit de la **perméabilité** du milieu autour duquel sont enroulées les spires. Pour le vide (ou pour l'air "sec"), ce paramètre s'appelle  $\mu_0$  et est égal à  $4 \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ . Pour les matériaux magnétiques comme le fer, le nickel ou le cobalt,  $\mu$  varie de 20 à 3000 selon le matériau et sa forme. On comprend donc aisément l'avantage que l'on a à enrouler nos spires autour de noyaux composés de ces matériaux.

### Énergie emmagasinée

Une bobine est capable d'emmagasiner de l'énergie au même titre que le condensateur. Il s'agit pour la bobine d'énergie magnétique.

Pour une bobine d'inductance  $L$ , traversée par un courant  $I$ , l'énergie emmagasinée, exprimée en joule (J), est donnée par la formule :

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2$$

Avec :

- $E$  : l'énergie en Joule (J)
- $L$  : l'inductance de la bobine en Henry toujours (H)
- $i$  : l'intensité du courant parcourant la bobine, en Ampères (A)



On ne se répète jamais assez : remplacez courant par tension et inductance par capacité et vous trouverez l'expression de l'énergie emmagasinée dans un condensateur ! Bobines et condensateurs se ressemblent, je vous dis. 😊

*Pour aller plus loin...*

Je ne vous ai pas démontré d'où viennent ces formules ni comment le Henry est défini, car, encore une fois, il s'agit de physique un peu trop avancée pour notre propos. Néanmoins, il me semble intéressant de vous parler de **flux**.

Vous avez peut-être déjà vu ce genre d'image :

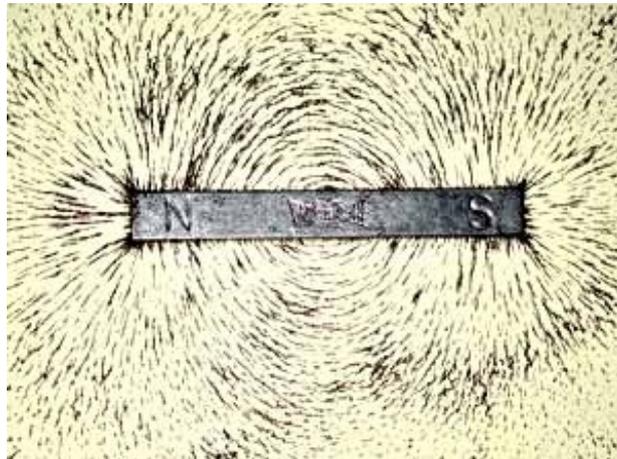


Figure 7 : champ magnétique d'une bobine

De la limaille - c'est-à-dire de la poudre - de fer est répandue autour d'un aimant (ici rectiligne, avec le pôle Nord à gauche et le pôle Sud à droite). La limaille va s'organiser et dessiner ces espèces de chemins partant d'un pôle pour arriver à l'autre ou partant vers l'infini et au-delà 😊. Ces chemins s'appellent des **lignes de champ** (magnétiques) et sont plus ou moins intenses : la limaille sera plus ou moins attirée sur ces chemins. Cette intensité de ligne de champ est appelée le **flux**  $\Phi$  ("phi", lettre grecque) et son unité est le **Weber**.



Mais pourquoi tu nous parles d'aimants ?

Tout simplement parce qu'une bobine traversée par un courant est un aimant et produit un flux. Je voulais également vous introduire cette notion pour pouvoir vous donner la définition rigoureuse du Henry :

*Le Henry est l'inductance de la bobine constituée d'une seule spire, parcourue par un courant de 1 ampère et générant un flux de 1 Weber qui, lui-même peut libérer une énergie égale à 1 joule.*

Ou mathématiquement :  $\Phi = L \cdot I$

## La bobine réelle

Depuis le début de cette partie, je vous mens un peu : une bobine dont le comportement n'est décrit que par l'inductance n'existe pas ; elle n'est que théorique.



On s'est fait avoir ! 😞

Euh... oui, désolé 😞. Mais rassurez-vous, dans la pratique, utiliser ce modèle idéal est très souvent suffisant.

En réalité, la technologie utilisée pour fabriquer une bobine (fil, spires, noyau, etc) engendre des éléments parasites, notamment :

- en série : une résistance, principalement due à celle du fil constituant la bobine (souvenez-vous lorsque je vous ai parlé de la résistance d'un fil dans le chapitre sur les résistances et résistors) ;
- en parallèle : une capacité, notamment due à un phénomène électrostatique entre spires, et qui changent son comportement en haute et très haute fréquences.



J'ai parlé de résistance et capacité !

Ce que je sous-entends par cette remarque est que c'est "**comme si**" il y avait un résistor et un condensateur respectivement en série et en parallèle, induisant des **effets** résistif et capacitif, mais dans la réalité, **il n'y en a pas**.

Pas évident, hmm? 🤔

Sachant tout cela, on peut représenter **un** modèle de bobine plus proche de la réalité sous la forme suivante :

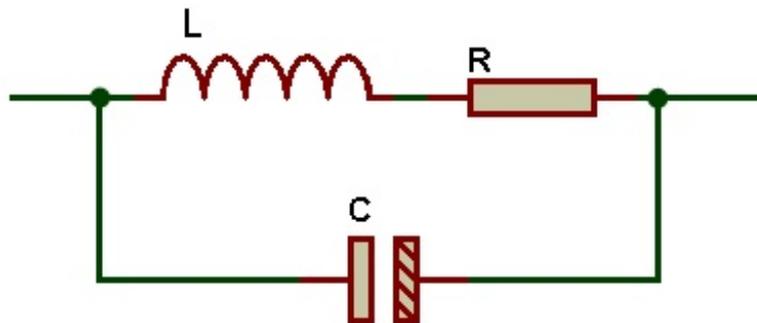


Figure 8 : modèle équivalent d'une bobine réelle

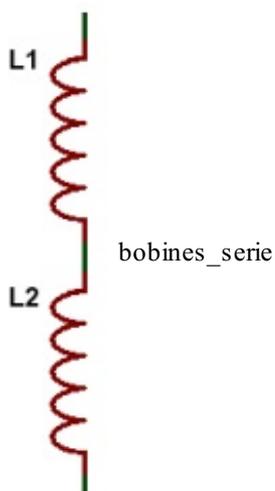
Au risque de me répéter, la résistance et le condensateur **n'existent pas**. Il s'agit uniquement d'un **modèle** de bobine réelle, que vous pouvez utiliser lors de vos analyses de circuit.

Pour être complet, je dois ajouter qu'il existe d'autres modèles plus proches encore de la réalité, prenant en compte d'autres effets parasites, mais ce premier modèle est déjà très fidèle et vous suffira amplement pour tous vos bricolages.

## Les associations de bobines

Poursuivons notre tour d'horizon des propriétés des bobines en étudiant leurs associations.

### Bobines en série

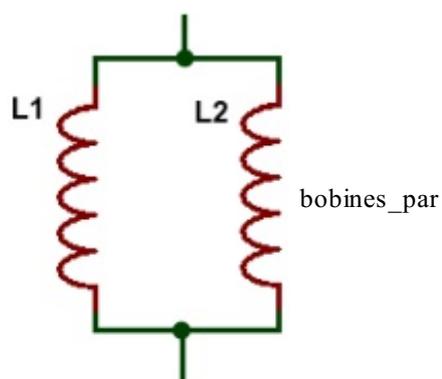


Dans un groupement en série, l'inductance équivalente est la somme des inductances :

$$L_{eq} = L1 + L2$$

Si l'une des bobines a une inductance très supérieure à l'autre, par exemple  $L1 \gg L2$ , alors  $L_{eq} \approx L1$ .

### Bobines en parallèle



Dans un groupement parallèle, l'**inverse** de l'inductance équivalente est la somme de l'**inverse** des inductances :

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L1} + \frac{1}{L2}$$

Soit  $L_{eq} = \frac{L1 \cdot L2}{L1 + L2}$ , cela ressemble au pont diviseur de tension constitué

de résistances. On verra plus loin pourquoi.

Si l'une des bobines a une inductance très inférieure à l'autre, par exemple  $L1 \gg L2$ , alors  $L_{eq} \approx L2$ .



En somme, les associations de bobines sont opposées à celles des condensateurs.

## La bobine en régime continu

Cette partie n'est pas difficile : **la bobine en régime continu est un fil !**



C'est tout ? Ça valait pas la peine de faire une partie pour cela !

C'est tout pour les propriétés. Intéressons-nous plutôt aux applications.

## Le soft-start

Le *soft-start* est, littéralement, le démarrage en douceur.

Certains montages sont sensibles aux brusques variations de courant. Pour éviter, lors de la mise en route, une élévation immédiate du courant, il suffit de placer une bobine dans la maille principale d'arrivée du courant. C'est le montage que je vous ai montré lorsque j'ai introduit la bobine.

Ce système existe aussi avec des condensateurs, pour des circuits sensibles aux fortes variations de tension.

## Les relais

Un relais est un système de commutation (en clair, un interrupteur 🤖) commandé par une bobine.

Je vous présente un relais et vous explique ensuite comment l'utiliser.



Figure 9 : photo d'un relais -

image issue de Wikipédia

Vous voyez par transparence une bobine à droite, et des connecteurs divers à gauche.

Et en voici une schématisation :

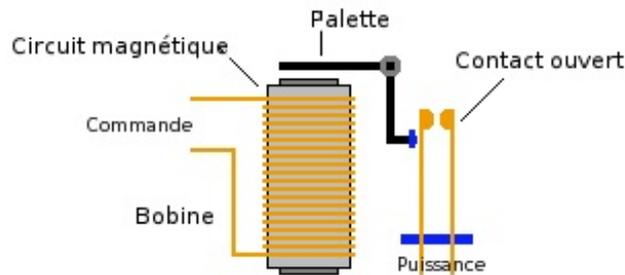


Figure 10 : schématisation d'un relais -  
image issue de Wikipédia

### Principe de fonctionnement

Je vous l'avais dit, une bobine traversée par un courant est un aimant. Le relais se sert de cette propriété :

- lorsque aucun courant n'est appliqué à la bobine, la palette (voir ci-dessus) est libre, les connecteurs ne sont pas en contact et aucun courant, ni aucune puissance, n'y circulent : c'est un **interrupteur ouvert**.
- lorsqu'un courant est appliqué à la bobine, la palette est attirée vers la bobine, et pousse, par un jeu de levier le connecteur de gauche sur celui de droite. Il y a contact : c'est un **interrupteur fermé**.

### Intérêts

Les relais peuvent être utilisés pour différentes applications.

Il est par exemple possible de commander avec un circuit de faible puissance (circuit de la bobine) un circuit de forte puissance (celui des connecteurs). Il est toujours préférable de limiter la puissance où cela est possible, dans un souci d'économie d'énergie et de sécurité. Par exemple, vous pouvez commander avec un montage électronique fonctionnant sur du 9V, une ampoule connectée au 230V du réseau électrique, ceci grâce au relais. Ce dernier offrant **une isolation galvanique** entre le montage et l'ampoule.

Par ailleurs, un relais peut être commandé numériquement (avec des 0 ou des 1 logiques) pour laisser passer (ou non) un signal analogique (comme un signal audio).

### La bobine en régime variable

#### L'impédance d'une bobine

Tout comme le condensateur, il est possible de définir l'impédance d'une bobine (idéale) :

$$Z_L = 2\pi f \cdot L$$

Avec :

- $Z_L$  : l'impédance de la bobine en Ohm ( $\Omega$ ) ;
- $f$  : la fréquence appliquée à la bobine en Hertz ( $Hz$ ) ;
- $L$  : l'inductance de la bobine.

Je le rappelle, l'impédance est une propriété fictive. Si vous mesurez à l'ohmmètre une bobine, vous obtiendrez une valeur qui correspond uniquement à la résistance de l'enroulement de fil, et non la valeur de l'impédance, qui dépend de la fréquence appliquée.

Il est également possible d'utiliser  $\omega = 2\pi f$  et donc de mettre la formule précédente sous la forme suivante :  $Z_L = L\omega$



Il s'agit bien ici de l'impédance d'une bobine **idéale**. Si vous utilisez un modèle avec une résistance ( $R_S$ ) en série, l'impédance devient :  $Z_{L_{mod}} = \sqrt{R_S^2 + L^2\omega^2}$ .

### Loi d'Ohm

Toujours comme pour le condensateur, l'impédance de la bobine peut servir pour calculer des valeurs de tension ou de courant par la loi d'Ohm généralisée :

$$U = Z \cdot I$$

Avec :

- $U$  : tension en V
- $Z$  : impédance en  $\Omega$
- $I$  : intensité du courant en A

### Retard de phase

Réalisons un montage simple, et plaçons-y des appareils de mesures :

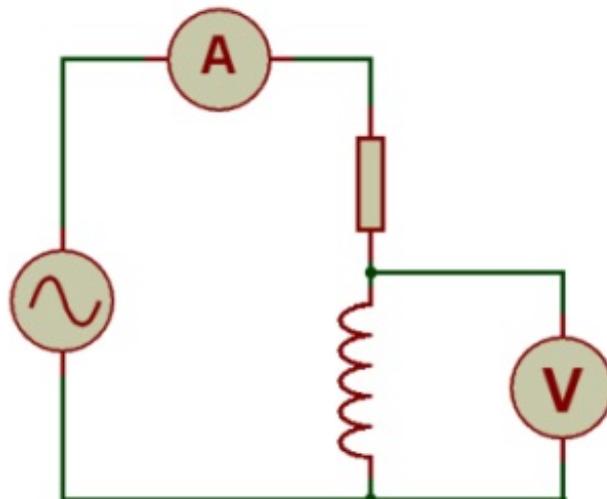


Figure 11 : mesure du déphasage

Voilà ce que l'on observe, tension et courant en fonction du temps :

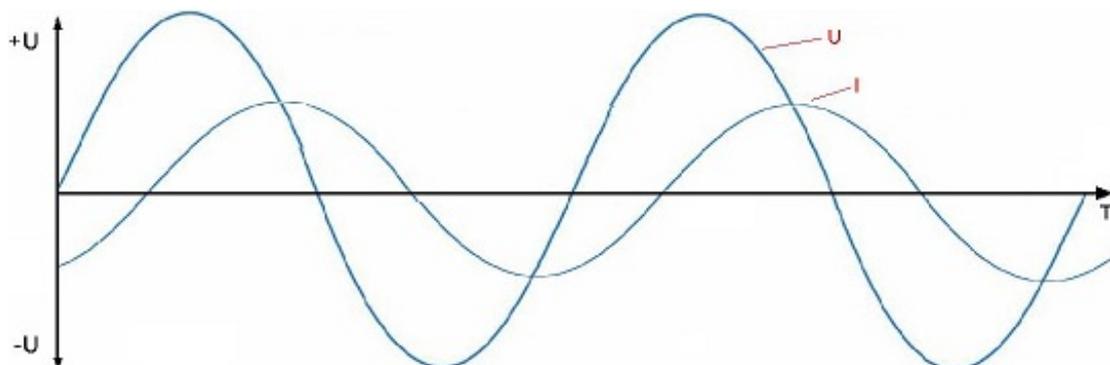


Figure 12 : retard du courant par rapport à la tension

Dans une bobine, le courant est déphasé (en retard) de  $90^\circ$  par rapport à la tension : il est "ralenti". C'est exactement l'inverse du condensateur où c'est la tension qui est en retard par rapport au courant.

## Comportement fréquentiel

A présent, intéressons-nous, pour une bobine idéale, aux variations de la tension  $U$  pour une valeur de courant  $I$  donnée, en fonction de la fréquence.

### Fréquence nulle

$$\text{Si } f = 0 \text{ alors } U = Z \cdot I = 2\pi f \cdot L \cdot I = 0$$

A fréquence nulle, c'est-à-dire en régime continu, la bobine se comporte comme un fil (😎 C'est bien ce que je disais plus haut !)

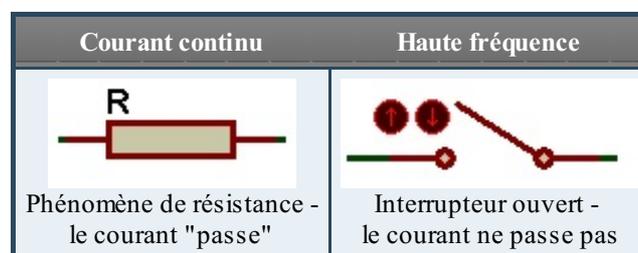
### Fréquence infinie

Plus le générateur va monter en fréquence, plus la tension va augmenter (dans les limites du générateur).

On va dire que la bobine a un comportement **passé-haut** : elle laisse passer les hautes fréquences sans problèmes ; en revanche, elle atténue les basses. Nous reviendrons plus en détail sur ces notions dans le chapitre sur le filtrage.

### Conclusion

Pour une bobine réelle, son comportement est différent selon la fréquence du signal qui lui est appliqué. Pour une fréquence nulle, la bobine se comporte comme une impédance ; pour une fréquence infinie, la bobine est équivalente à un interrupteur ouvert.



## Pour aller plus loin

Je vais ici parler un peu plus du phénomène d'induction qui régit le fonctionnement des bobines. Cette partie est essentiellement culturelle.

## Le phénomène d'induction

Branchons une bobine sur un galvanomètre et déplaçons un aimant droit dans son environnement :

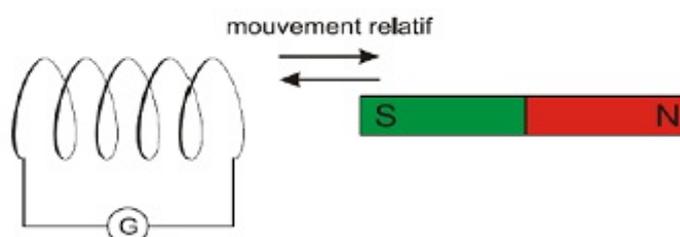


Figure 13 : expérience avec un bobine et un aimant droit

D'abord, déplaçons l'aimant tel qu'il est orienté de la droite vers la gauche. L'aiguille du galvanomètre dévie.



Je vais supposer que l'aiguille dévie vers la droite. En réalité, cela dépendra du galvanomètre.

Lorsque le déplacement cesse, l'aiguille revient à sa position de repos.

A présent, déplaçons notre aimant, toujours orienté de la même manière, de gauche à droite. L'aiguille du galvanomètre dévie dans l'autre sens, vers la gauche !

Maintenant, renversons l'orientation de l'aimant et recommençons cet aller-retour. L'aiguille dévie d'abord vers la gauche, puis vers la droite !

Enfin, accélérons nos mouvements : les déviations sont plus importantes.

### Interprétation

Lorsqu'il y a déplacement d'une source du champ magnétique (ici l'aimant) près d'un circuit électrique fixe (ici la bobine), une tension apparaît aux bornes du circuit : il se comporte comme un générateur. A l'intérieur du circuit, une **force électromotrice (fém)** engendre cette tension.

### Un peu de vocabulaire

- La source de champ variable (ici l'aimant droit) est appelée l'**inducteur** ;
- Le circuit dans laquelle apparaît la fém (ici la bobine) est appelé l'**induit** ;
- la fém est appelé force électromotrice **induite** et le phénomène **induction électromagnétique** ;
- le courant associé à la fém est appelé **courant induit** (comme c'est original 🤖).

### La loi de Lenz

La loi de Lenz s'exprime simplement :

*Le phénomène d'induction électromagnétique est tel que par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.*



Euh... oui, mais encore ? Concrètement, ça signifie quoi ?

Eh bien la loi de Lenz nous permet - entre autres - de déterminer rapidement l'orientation de la fém induite créée dans un circuit.

Je rappelle d'abord qu'une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant. Les lois de l'électromagnétisme (établies par Maxwell au passage 😊) permettent de relier le sens du courant aux lignes de champ magnétique et donc de déterminer les pôles de l'aimant ainsi créé.

Je ne vais pas vous le démontrer, ce serait trop compliqué, mais voici une illustration des lois de Maxwell :

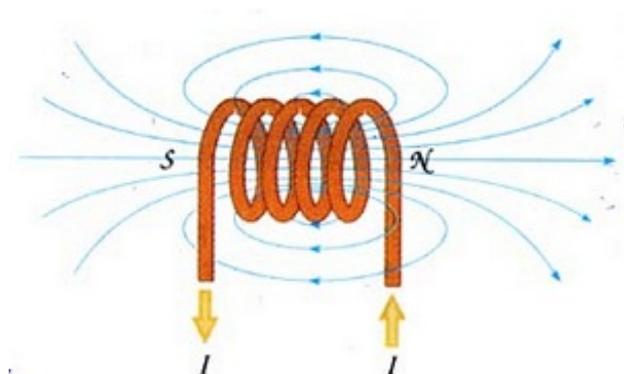


Figure 14 : champ magnétique d'une bobine

Reprenons à présent notre circuit, et supposons-le fermé. La loi de Lenz nous dit que le courant induit, de par sa circulation dans le circuit s'opposerait à la cause qui lui donne naissance.

Ainsi, si l'on approche le pôle Nord de l'aimant de la bobine par la droite, le courant induit fait apparaître un pôle Nord dans la bobine à droite, pour repousser l'aimant (les pôles de même nature se repoussent). On peut alors en déduire, grâce au schéma précédent, le sens du courant induit et par suite celui de la fém induite, dans le même sens que le courant puisque la bobine se comporte comme un générateur.

### *L'auto-induction*

Dans ce cas précis, l'inducteur est aussi l'induit.

Imaginons une bobine (parcourue par un courant  $I$ ) dans un circuit.

- Si  $I$  varie, une fém apparaît aux bornes de la bobine pour contrecarrer cette variation ;
- Si le flux magnétique créé par la bobine est perturbé (par un aimant par exemple), un courant induit s'ajoute à  $I$  pour contrecarrer cette perturbation.

## Exemples d'applications du phénomène d'induction

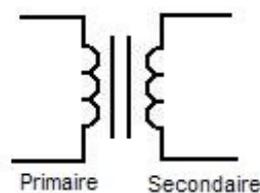
### *Les transformateurs*

#### Citation : Wikipédia

Un transformateur électrique est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme.

Un *transformateur* est constitué d'un assemblage de 2 bobines dites **primaire** (souvent le secteur, soit 220-230V ou 110V selon les pays) et **secondaire**.

Le symbole d'un transformateur représente bien ces deux bobines mises face à face :



Les deux barres verticales au centre représentent le noyau du transformateur, dont le rôle est similaire à celui des bobines.

Et voici à quoi cela peut ressembler :

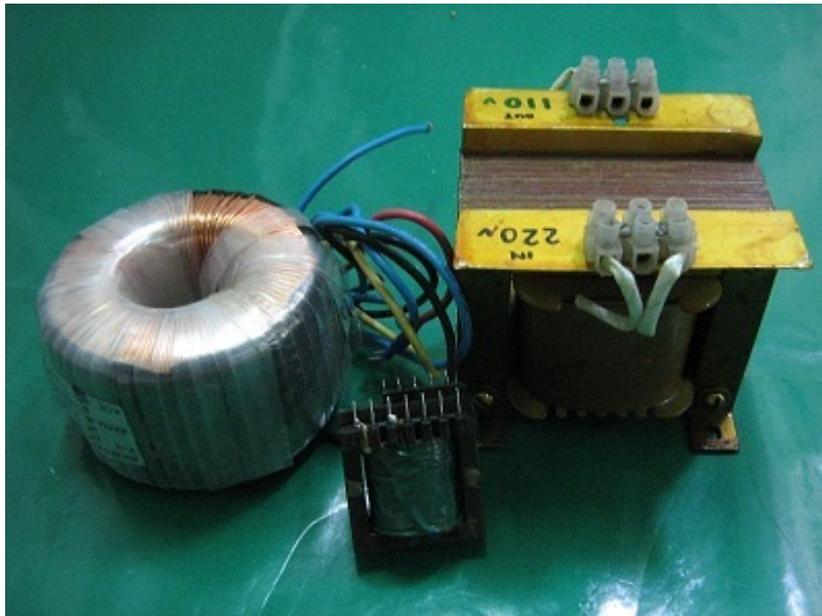


Figure 15 : photo de transformateurs -  
De gauche à droite, un transformateur : torique, pour circuit imprimé et à noyau de ferrite

Le principe est simple :

- le primaire est alimenté avec une tension alternative et est parcouru par conséquent par un courant alternatif. Il se comporte donc comme un aimant dont le champ magnétique varie, c'est-à-dire comme un aimant que l'on déplace, à **proximité du secondaire** ;
- le secondaire répond à cet aimant se déplaçant à proximité de lui par la loi de Lenz : il y a au secondaire une fém et un courant induits.



Comment alors transformer la tension ?

Tout est question de nombres de spires :

- plus le nombre de spires au primaire est important, plus le champ magnétique généré est intense ;
- plus le nombre de spires au secondaire est important, plus l'influence du champ magnétique à proximité est importante.

Ainsi, en jouant sur le rapport entre le nombre de spires au primaire et le nombre de spires au secondaire, il est possible de modifier (principalement abaisser, mais l'on peut aussi augmenter) la tension.

Pour un rapport donné, en doublant le nombre de spires, le champ magnétique est doublé, et par conséquent, le courant induit est doublé. Ainsi, il est également possible d'ajuster la valeur du courant.

### *Les micros de guitare électrique*

Les micros de guitare sont des systèmes très ingénieux. Voici comment ils sont construits :

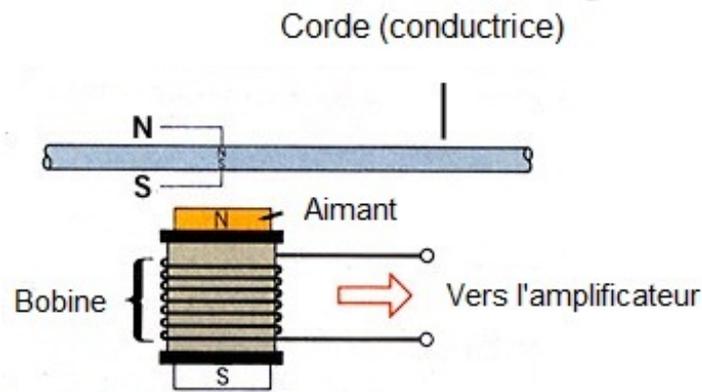


Figure 16 : micro de guitare électrique

Un aimant est entouré d'une bobine et est placé sous la corde, conductrice. Cette propriété de la corde est importante : un élément conducteur déforme les lignes de champ d'un aimant. C'est d'ailleurs grâce à cette propriété que les conducteurs sont attirés par les aimants.

Revenons à nos micros. Le fonctionnement est le suivant :

- le guitariste pince la corde conductrice ;
- la corde en mouvement perturbe le champ magnétique de l'aimant, à la fréquence de la corde ;
- la bobine autour de l'aimant "ressent" cette perturbation et, suivant la loi de Lenz, y répond par la création d'une tension et d'un courant induits, de même fréquence que le mouvement de la corde ;
- un amplificateur permet d'amplifier ce signal et de créer un son de même fréquence que celle de la corde, c'est-à-dire de créer la même note.

Vous venez de terminer la lecture du chapitre sur la bobine qui était le dernier chapitre parlant des composants passifs fondamentaux de l'électronique.

Je vous invite à passer au chapitre suivant qui vous permettra de valider vos connaissances en vous exerçant un peu. 😊

Savez-vous ? Quoi ? Eh bien vous venez d'acquérir des connaissances très utiles qui vous permettront déjà de créer vos propres montages. Cependant, ce "léger" bagage ne vous permettra pas de réaliser des montages très complexes. Vient alors la prochaine partie qui traitera des composants actifs, très utilisés pour créer des systèmes réagissant en fonction de paramètres que l'utilisateur peut émettre. Je ne vous en dis pas plus, je vous laisse découvrir..

## Partie 3 : [Théorie] L'amplificateur opérationnel ou AOP

Cette nouvelle partie va traiter d'un composant incontournable en électronique : l'**amplificateur opérationnel** ! Vous allez le voir, ce merveilleux composant nous offre la possibilité d'effectuer des fonctions étonnantes !

### L'amplification d'un signal

Avant d'entamer cette partie sur les AOP, je vous propose de nous mettre en accord sur certaines notions qui ne sont pas forcément évidente. A savoir : l'**amplification**, qu'est-ce que c'est ?

#### Rappels sur les signaux

Avant de commencer à parler d'amplification et d'amplificateur, je préconise que l'on fasse un rappel sur les signaux. Souvenez-vous en, je vous les ai présentés au premier chapitre de la deuxième partie.

#### Un signal...

...c'est une **grandeur physique qui varie en fonction du temps**. Par exemple, la tension présente sur le secteur électrique est une tension sinusoïdale de 50Hz. C'est à dire que, 50 fois par seconde, elle passe de 0V à 332V pour redescendre à -332V en passant par 0V, puis en remontant à 0V. Cela sous la forme d'une "belle" sinusoïde.

#### ...c'est aussi...

...une **somme de signaux sinusoïdaux**. La fonction mathématique *sinus* est la fonction de base qui constitue chaque signal. Autrement dit, chaque signal peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux. C'est l'image que je vous ai montrée, elle représente un signal "en dent de scie" fabriqué à partir d'une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence différente :

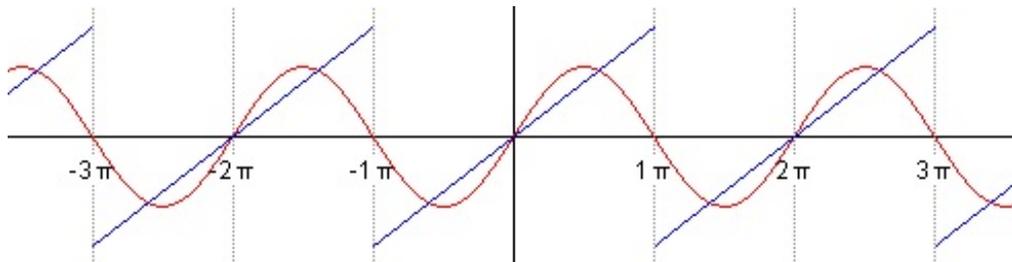


Figure 1 : source Wikipédia - somme de signaux sinusoïdaux formant un signal en dent de scie



Retenez bien ce point, on s'en servira pour comprendre certaines caractéristiques des amplificateurs.

#### ...et ça peut...

...être représenté par son **spectre**. On l'a également vu, le spectre d'un signal représente ses différentes harmoniques (qui ne sont autre que les signaux sinusoïdaux à des fréquences différentes) et leurs amplitudes.

Pour un signal carré (ou créneaux), le spectre donnait quelque chose dans ce genre là :

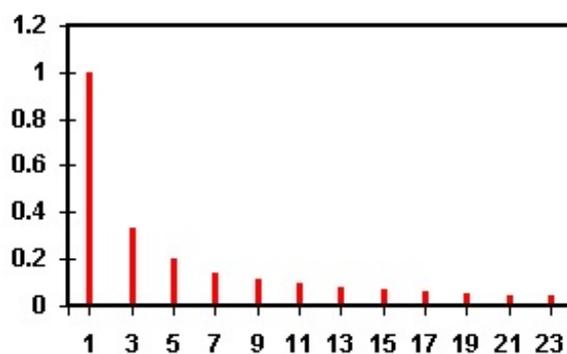


Figure 2 : spectre d'un signal carré

et pour un signal sinusoïdal :

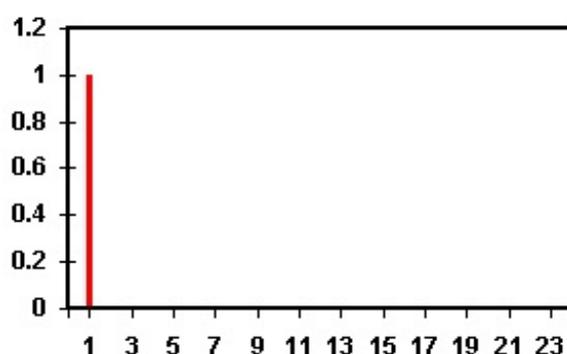


Figure 3 : spectre d'un signal sinusoïdal

A présent, je pense avoir rappelé l'essentiel, on va pouvoir approcher le principe d'amplification tranquillement. 😊

## Notions sur l'amplification

L'amplification est, de nos jours, très employée dans notre vie quotidienne. L'exemple le plus anodin serait l'amplificateur de salon ou home cinéma, qui vous permet de jouir d'un son à la hauteur de vos ambitions. Mais on utilise ce phénomène partout : pour amplifier la voix (téléphonie, amplificateur audio), pour amplifier des signaux ([traitement des signaux](#)) ou encore pour amplifier ou plutôt adapter la transmission de puissance.



Comment fonctionne l'amplification ? Et à quoi sert-il d'amplifier ?

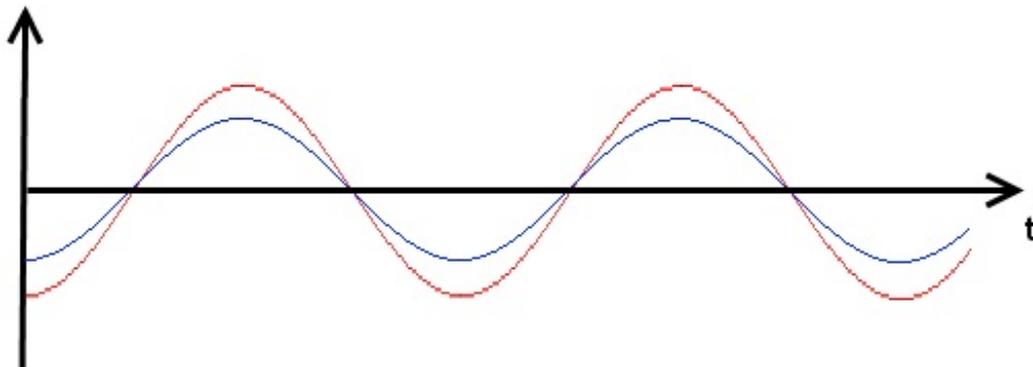
Le principe de l'amplification réside dans **le gain de puissance** pour un signal. C'est à dire que si j'amplifie un signal, ce dernier gagnera en puissance. Par exemple, un son émis par votre voix peut être amplifié par un amplificateur audio et ainsi gagner en puissance pour être entendu par toute l'audience (dans le cas d'une conférence, par exemple).

## Principe de l'amplification

Pour bien comprendre, nous allons prendre un exemple. Soit un signal sinusoïdal en fonction du temps :  $x(t)$ . Ce signal est amplifié par un dispositif d'amplification. En sortie de ce dispositif, on retrouve un signal  $y(t)$  qui est identique au signal  $x(t)$  à l'exception qu'il a été amplifié.



Figure 4 : principe d'amplification

Figure 5 : le signal d'entrée  $x(t)$ , en bleu, est amplifié et devient alors le signal de sortie  $y(t)$ , rouge

Notez qu'il n'y a pas de grandeur en ordonnée, car le signal pourrait être un courant ou une tension, voir même une puissance.

Bon, alors. Que c'est-il passé ?

Eh bien, le signal  $x(t)$  a été amplifié. Certes. C'est tout ? Non, bien sur. L'amplitude du signal a été modifiée. Plus exactement, elle a augmentée grâce à l'amplification. D'un point de vue mathématiques, le signal  $x(t)$  a subit l'opération suivante :

$$y(t) = a.x(t)$$

Avec :

- $x(t)$  : signal d'entrée
- $y(t)$  : signal d'entrée amplifié en sortie
- $a$  : facteur d'amplification

On a multiplié le signal d'entrée par un **facteur d'amplification**. Je l'ai nommé  $a$  (pour amplification), mais ce nom est totalement arbitraire. On le retrouve par exemple noté :  $A_V$  ou  $G$ .

### Finalemnt

Pour résumer, **l'amplification est la simple multiplication d'un signal par un facteur d'amplification**. Ce facteur n'a, en général, pas d'unité.

Il est dans la pratique d'employer le terme de **gain d'amplification**.

Le signal amplifié est différent du signal à amplifier, dans le sens où le signal amplifié est la multiplication du signal à amplifier par le gain d'amplification (cf. la formule précédente).

## Les types d'amplifications

Nous allons nous mettre d'accord sur certains points à ne pas confondre afin, justement, d'éviter toutes confusions. 😊

Il y a deux choses que l'on peut faire lorsqu'on amplifie un signal :

- soit amplifier son amplitude (on parle alors d'adapter un signal)
- soit amplifier sa puissance

Alors, me direz-vous, le fait d'amplifier l'amplitude ou la puissance revient au même puisque d'après la loi  $P = U \cdot I$ , le courant et la tension sont liés à la puissance. Donc le fait de modifier l'un ou l'autre, cela influence sur la puissance. C'est justement sur ce dernier point que nous allons nous mettre d'accord.

### L'amplification d'amplitude

Lorsque l'on parlera d'amplification d'amplitude, cela voudra dire que l'on amplifie l'amplitude du signal lui-même. Un peu confus, non ? 😊

En fait, on va amplifier l'amplitude du signal, sans être obligé d'amplifier sa puissance. Par exemple, je peux très bien amplifier une tension, sans amplifier son courant (en augmentant la valeur de la résistance, par exemple) et ainsi ne pas amplifier la puissance. On peut aussi amplifier juste le courant (avec un transistor) sans changer la tension et son amplitude. Dans le cas le plus courant, il y a bel et bien une amplification de puissance.

### L'amplification en puissance

L'amplification en puissance est semblable à l'amplification d'amplitude, sauf que là on choisit bien d'amplifier la puissance. Donc, sans changer la valeur de la résistance on peut amplifier la tension ou le courant, voir même les deux.

## L'amplification par l'exemple

Prenons l'exemple d'une tension sinusoïdale appliquée sur un résistor :

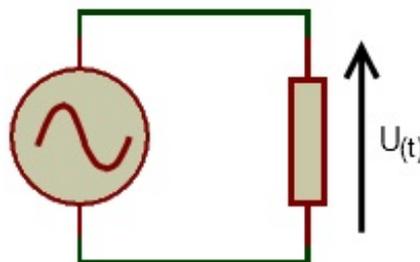


Figure 7 : montage

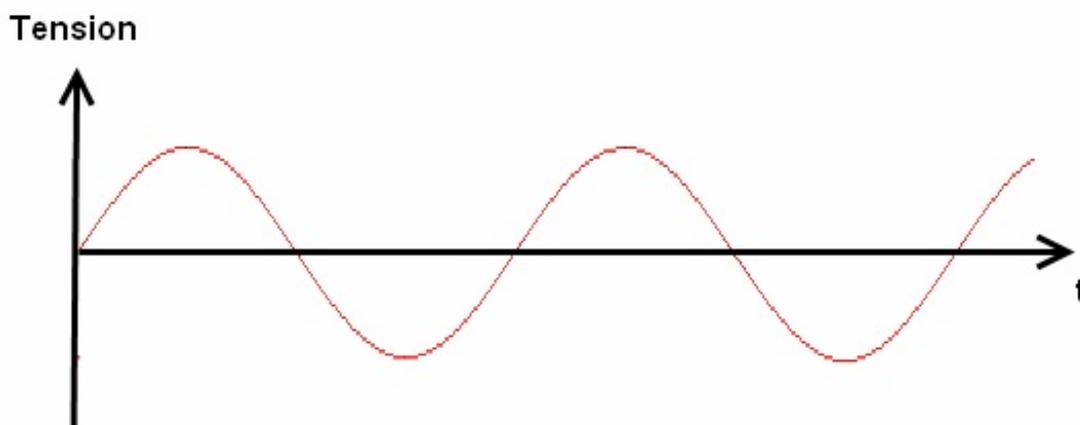


Figure 7 : tension sinusoïdale  $U(t)$  aux bornes du résistor

La puissance, en fonction du temps, à travers le résistor est alors de  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ . Pour une tension sinusoïdale de

12V efficace et un courant de 10mA, j'aurais une puissance de :  $P(t) = 12 \times 0.01 = 1.2W$

Mon but est d'amplifier ce signal, ce qui est relativement simple en soi. Pour ceci je rajoute un étage d'amplification au montage :

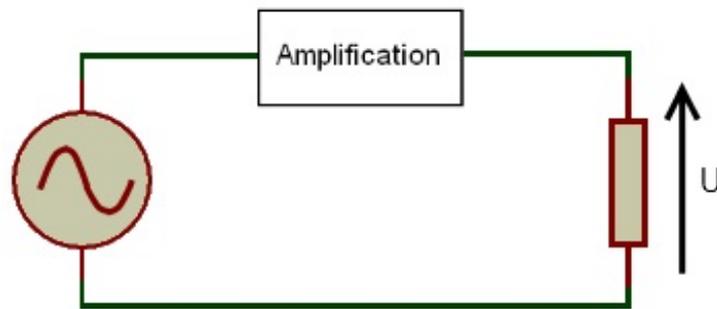


Figure 8 : amplification du signal aux bornes du résistor

Le signal aux bornes du résistor est maintenant différent.

Pour un facteur d'amplification de 2, la puissance serait de :

$$\begin{aligned} P(t) &= a \cdot U(t) \cdot I(t) \\ P(t) &= 2 \times 12 \times 0.01 \\ P(t) &= 2.4W \end{aligned}$$

On a donc bien amplifié la puissance du signal.

### Généralités sur les amplificateurs

A présent, voyons quels sont les dispositifs qui permettent d'amplifier un signal. Il s'agit, vous l'aurez deviné, des **amplificateurs**.

### Un amplificateur, c'est quoi ?

Un **amplificateur est un dispositif qui amplifie un signal électrique**. Son fonctionnement réside sur le principe de l'amplification, que l'on vient de voir. En électronique, cela ne peut être, par exemple, qu'un circuit intégré, voire même un dispositif simple, tel le transistor. En audio, un amplificateur est en général un appareil électrique qui amplifie le son. Dans les deux cas, il s'agit d'amplification.

#### Représentation

Il est dans la logique de représenter un amplificateur par un **quadripôle**. Du fait qu'il possède, dans le cas le plus simple, une entrée et une sortie (d'où les quatre pôles, avec la masse).



Figure 9 : représentation d'un amplificateur par un quadripôle

Voilà, d'un côté rentre le signal à amplifier ; de l'autre côté sort le signal amplifié.

On verra tout à l'heure pourquoi on le représente comme cela et qu'est-ce qu'il contient. 😊

#### Les types

On distingue plusieurs type d'amplificateurs, je ne vais cependant n'en développer que deux, à savoir : l'**amplificateur audio** et l'**amplificateur opérationnel**.

Le premier ressemblait à ça au temps des amplificateur à tubes :



Figure 10 : amplificateur à tube - source Wikipédia

Son but était donc d'amplifier des signaux audio (musique, voix, etc.). Quant au second, il est encore utilisé de nos jours et sert plus généralement à amplifier des signaux (musique, signaux de données, etc.) :

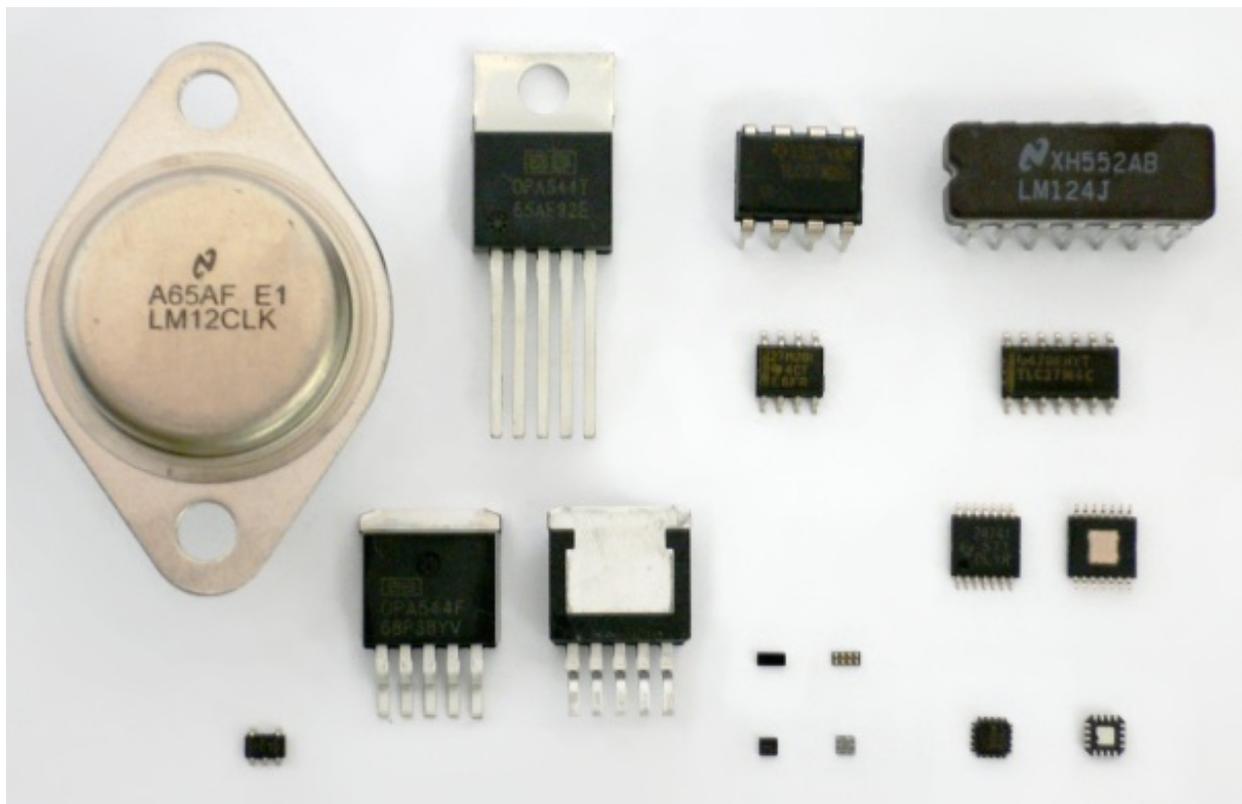


Figure 11 : amplificateurs opérationnels - source Wikipédia



Chacun des deux amplificateurs que je viens de vous montrer se basent sur le même principe : l'amplification. En théorie, ils sont capable de faire la même chose. Cependant, ce ne sera pas toujours le cas, on verra pourquoi.

## Fonctionnement d'un amplificateur quelconque

Je vous l'ai dit il y a un instant, un amplificateur peut se représenter par un quadripôle. Reprenons l'image que je vous ai montré et étoffons-la par quelques rajouts utiles :

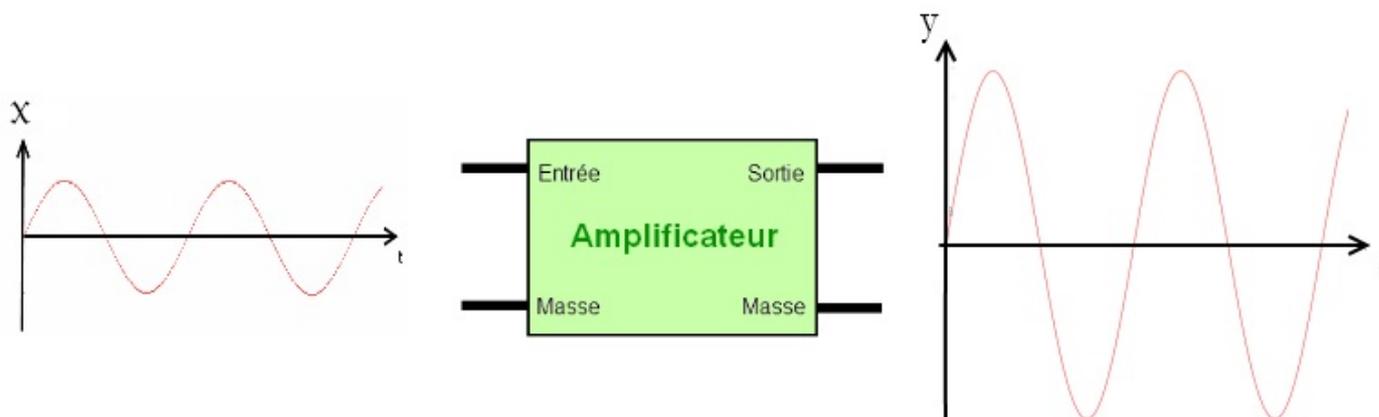


Figure 12 : amplificateur représenté sous forme de quadripôle amplifiant un signal  $x(t)$  et fournissant un signal  $y(t)$

En entrée de l'amplificateur, on a un signal  $x(t)$ . Ce signal passe à travers l'amplificateur et ressort de ce dernier comme étant un nouveau signal  $y(t)$ , identique au signal  $x(t)$ , à l'exception que son amplitude est augmentée et sa puissance également.

Jusque là, rien de bien nouveau, on applique simplement ce que l'on a vu sur l'amplification.

### Impédances d'entrée et de sortie

A présent, entrons au cœur de ce quadripôle et regardons comment il se comporte et ce qu'il contient.

Un amplificateur, étant donné qu'il amplifie, ne doit pas absorber une grande puissance sur son entrée. En effet, je rappelle qu'un signal n'a pas forcément une puissance énorme, donc il ne fournit pas une puissance suffisante pour que l'amplificateur, s'il absorbait beaucoup de puissance à son entrée, puisse amplifier le signal. De même, en sortie de l'amplificateur, la puissance à fournir est souvent importante. De cela, l'amplificateur doit donc pouvoir fournir une puissance importante. D'où l'intérêt de l'amplification.

En somme, on peut modéliser un amplificateur comme ayant une impédance d'entrée très grande et une impédance de sortie très faible :

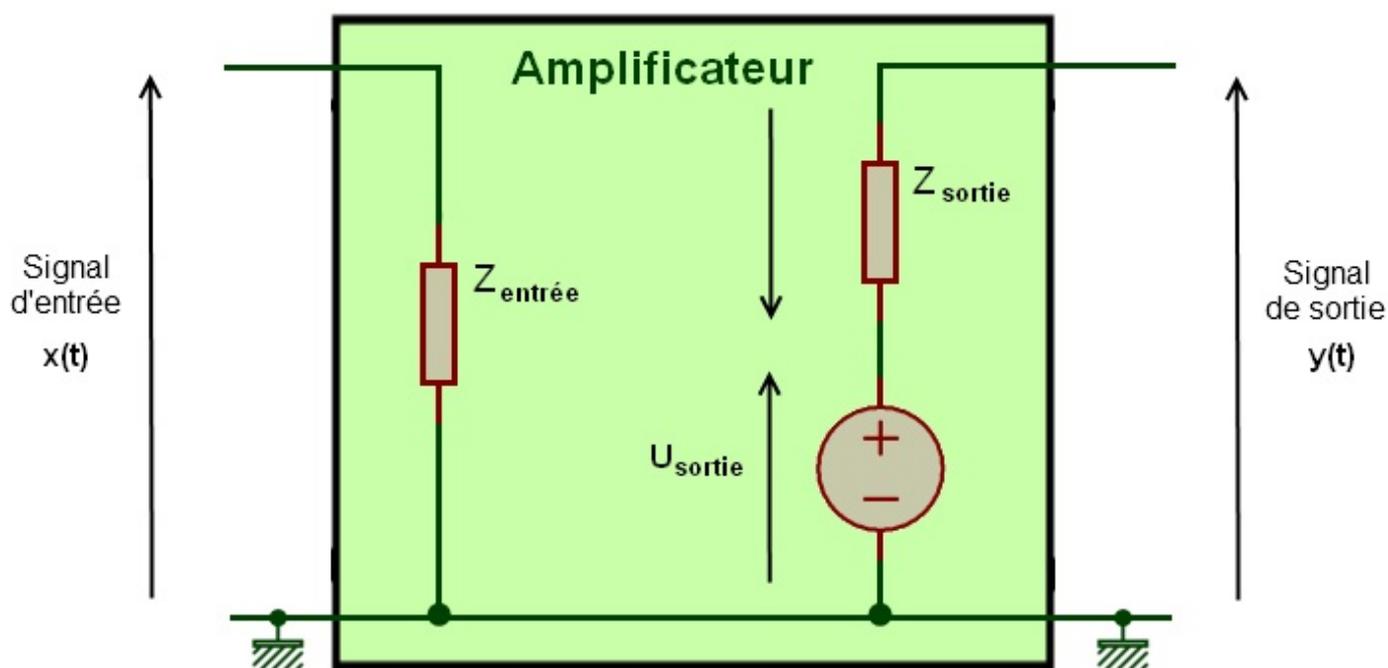


Figure 13 : modèle équivalent d'un amplificateur

Bien sur, vu comme ça, ce montage n'a absolument aucune utilité puisque rien ne lie l'entrée à la sortie. On aura beau envoyé un signal sur son entrée, le montage ne fournira rien en sortie. Mais ceci n'est qu'un modèle de l'amplificateur. Il existe donc une relation entre l'entrée et la sortie de l'amplificateur et c'est ce que nous allons voir maintenant.

### *Relation entre entrée et sortie*

Eh bien, en fait, cette relation est celle que je vous ai montré lorsque je vous ai parlé d'amplification. Il s'agira donc de ceci :

Pour un signal entrant nommé  $x(t)$ , le signal en sortie de l'amplificateur  $y(t)$  est tel que :  $y(t) = a \cdot x(t)$ ;  $a$  étant le facteur d'amplification.

## Caractéristiques universelles

### *Consommation énergétique*

Un amplificateur a beau amplifier la puissance d'un signal, il n'en a pas moins besoin pour fonctionner. Eh oui ! Pour fonctionner, un amplificateur a besoin d'énergie ! Il consomme donc de la puissance et en fournit au signal à amplifier selon le schéma suivant :

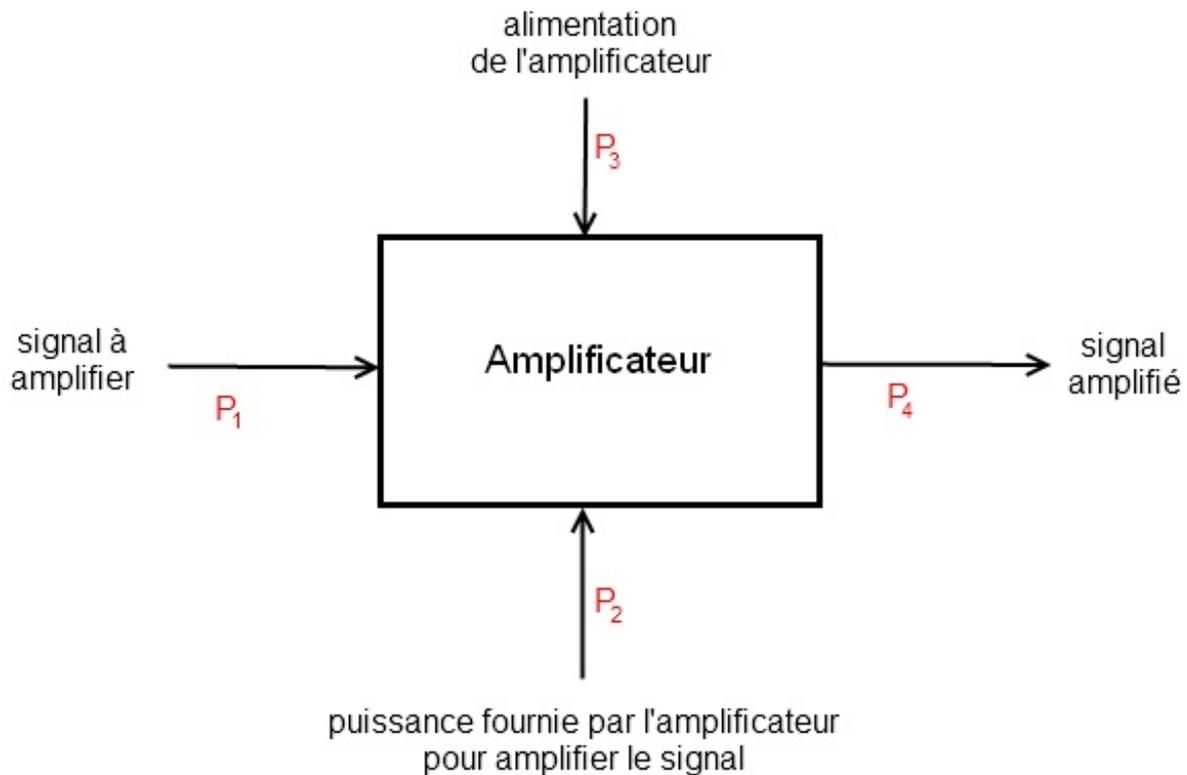


Figure 14 : puissances traversant un amplificateur

Vous le voyez, il y a un transfert de puissance qui se fait.

- Premièrement, la puissance du signal d'entrée  $P_1$ . On l'a dit, elle est faible et l'impédance d'entrée de l'amplificateur est grande. On peut d'ores et déjà la négliger.
- En revanche, la puissance fournie par l'amplificateur pour amplifier le signal,  $P_2$ , est loin d'être négligeable. Au contraire, c'est celle qui nous intéresse car elle va influencer la puissance du signal de sortie.
- Cette dernière puissance est extraite de l'alimentation de l'amplificateur. Or, comme l'amplificateur réel possède des pertes d'énergies, cette puissance  $P_3$  est supérieure à  $P_2$ .
- Enfin, le signal de sortie a une puissance  $P_4$  très grande.

Si on liste les relations qui existent entre ses puissances, cela nous donne ceci :

$$P_4 = P_1 + P_2 \approx P_2$$

Je l'ai dit, la puissance du signal d'entrée est négligeable face à  $P_2$ . On utilise donc cette approximation qui tend à être vraie.

$$P_3 > P_4$$

Oui, car c'est le rendement de l'amplificateur. Plus la puissance  $P_4$  se rapproche de la puissance  $P_3$ , plus le rendement de l'amplificateur est bon.

### *La bande passante et la réponse fréquentielle*

La bande passante d'un amplificateur est la gamme de fréquence des signaux que peut amplifier l'amplificateur. En théorie, un amplificateur idéale doit pouvoir amplifier des signaux ayant une fréquence comprise entre  $0\text{Hz}$  et  $+\infty\text{Hz}$ . Dans la réalité, cela dépend de l'amplificateur.



Pour être de bonne qualité, un amplificateur audio doit pouvoir amplifier une gamme de fréquence comprise entre  $20\text{Hz}$  et  $20\text{kHz}$ .

Voilà un exemple de courbe en réponse fréquentielle d'un amplificateur :

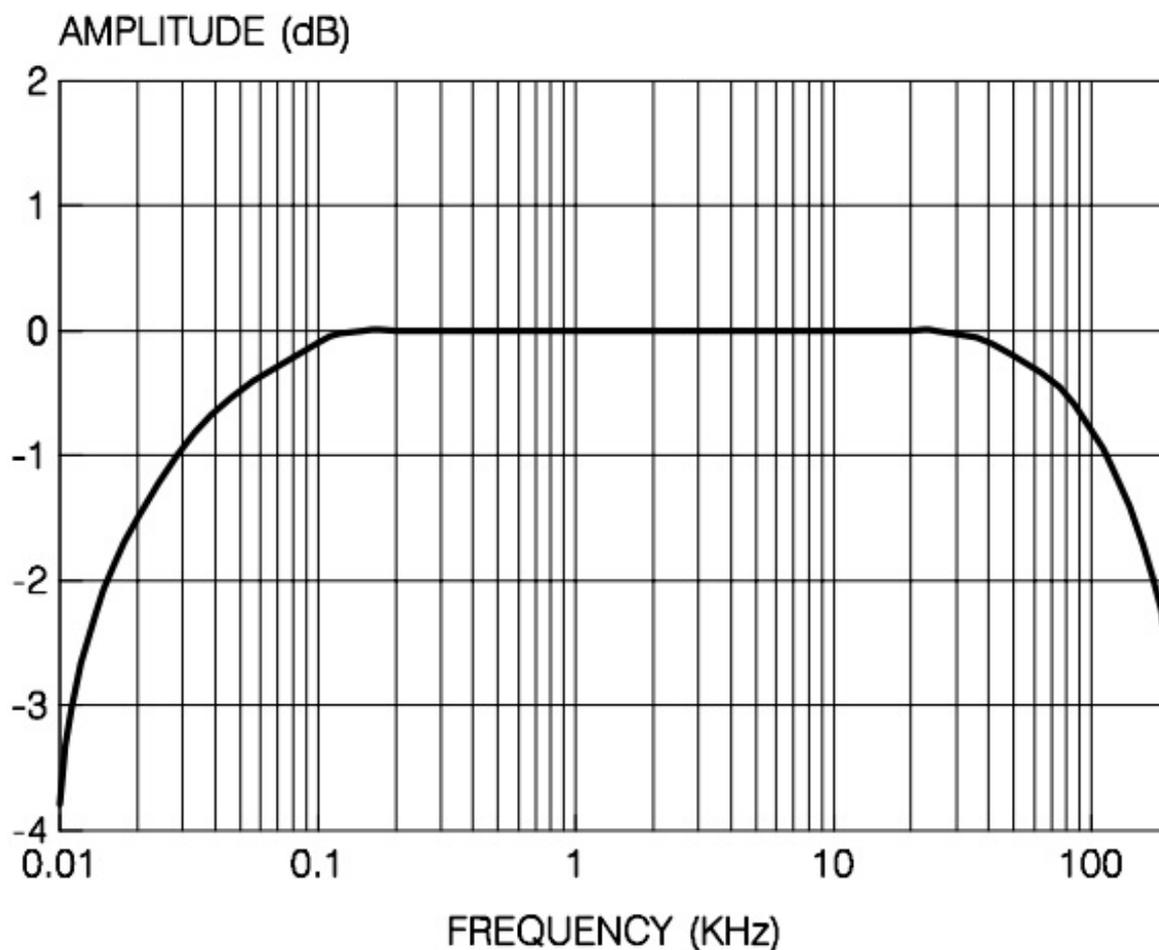


Figure 15 : exemple de réponse fréquentielle d'un amplificateur - extrait de la documentation de l'amplificateur opérationnel TDA7294 du constructeur STI Microelectronics

Cette courbe représente l'atténuation des fréquences par l'amplificateur. Si l'atténuation est de 0, alors le signal en entrée de l'amplificateur est amplifié d'un facteur 1. S'il est inférieur à 0, alors le signal d'entrée est **atténué**. On reparlera de ce diagramme plus loin où je vous expliquerai plus en détail comment le lire. 😊



Moi je veux pas attendre, je veux savoir ce que dit ce diagramme ! 😞

Bon eh bien la bande passante de cet amplificateur à **0dB** (décibels) est comprise entre environ **115Hz** et **25kHz**. Je ne vous en dit pas plus, on aura l'occasion d'en reparler.

Ce qu'il faut retenir sur l'atténuation, c'est que le signal que l'on applique en entrée de l'amplificateur est plus ou moins amplifié par rapport à sa fréquence (cf. courbe précédente). Prenons l'exemple avec cet amplificateur (le TDA7294), en appliquant un signal de fréquence **1kHz**, l'amplification est de **0dB**. En revanche, dès lors que le signal change de fréquence et passe, admettons, à **100kHz**, l'amplification du signal sera différente, entre autre **-1dB** pour notre cas. C'est ça l'atténuation d'un signal. Bien sûr, cette atténuation est différente pour chaque amplificateur, cela dépend de sa réponse en fréquence.

### La distorsion

Voilà un bien étrange mot. La **distorsion** est en fait une déformation du signal de sortie par rapport au signal d'entrée de l'amplificateur. Ce phénomène est du à la bande passante de l'amplificateur.

Reprenons. Un signal non sinusoïdal est une somme de signaux sinusoïdaux. Ces signaux sont de fréquences plus élevées que

l'harmonique de rang 1 (le signal "de base" à la fréquence la plus faible). Imposons un signal crêteaux à l'entrée de l'amplificateur TDA7294, dont je vous ai donné la courbe de réponse en fréquence. Disons que ça fréquence est de 20kHz, proche de la limite de la bande passante de l'amplificateur en question :

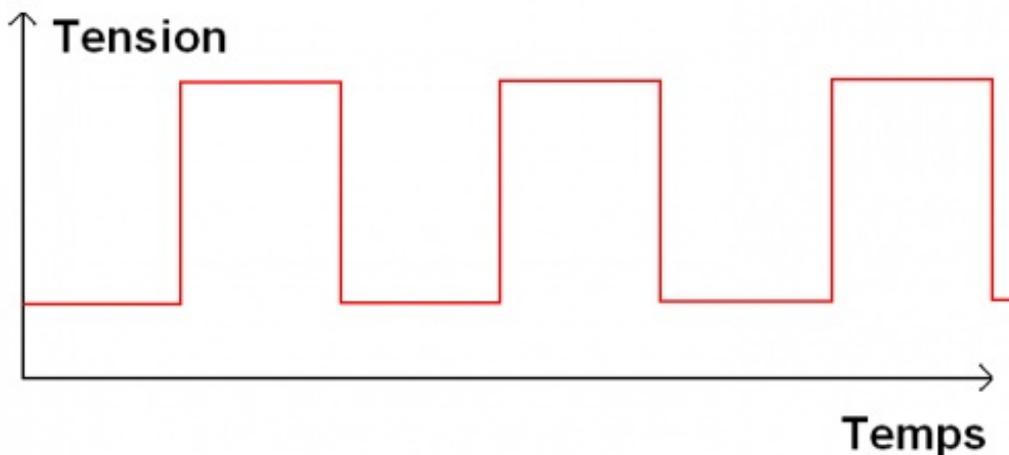


Figure 16 : signal crêteaux appliqué en entrée du TDA7294

Rappelons que le spectre de ce signal est de cette allure :

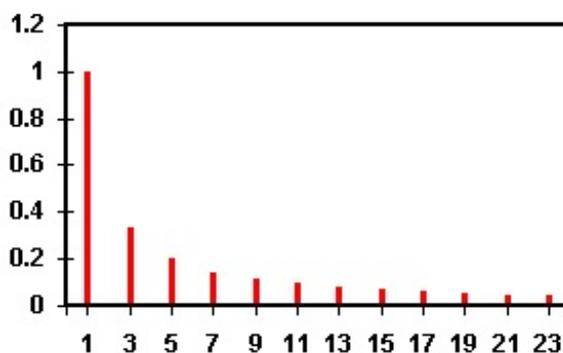


Figure 17 : spectre du signal crêteaux appliqué en entrée du TDA7294 -  
en abscisses : fréquence en kHz ; en ordonnées : amplitude en V

Les harmoniques de ce signal sont présentes sur une grande plage de fréquence, en théorie jusqu'à l'infini. Bon, soit. Ce qui nous intéresse, ce sont les fréquences supérieures à 25kHz. Pourquoi ? Tout simplement parce qu'elles sont "hors bande passante" de l'amplificateur. Du coup, l'amplificateur va les atténuer et cela va donc déformer une partie du signal.

En somme, le signal de sortie ressemblera plus à celui-ci qu'à celui appliqué en entrée de l'amplificateur :

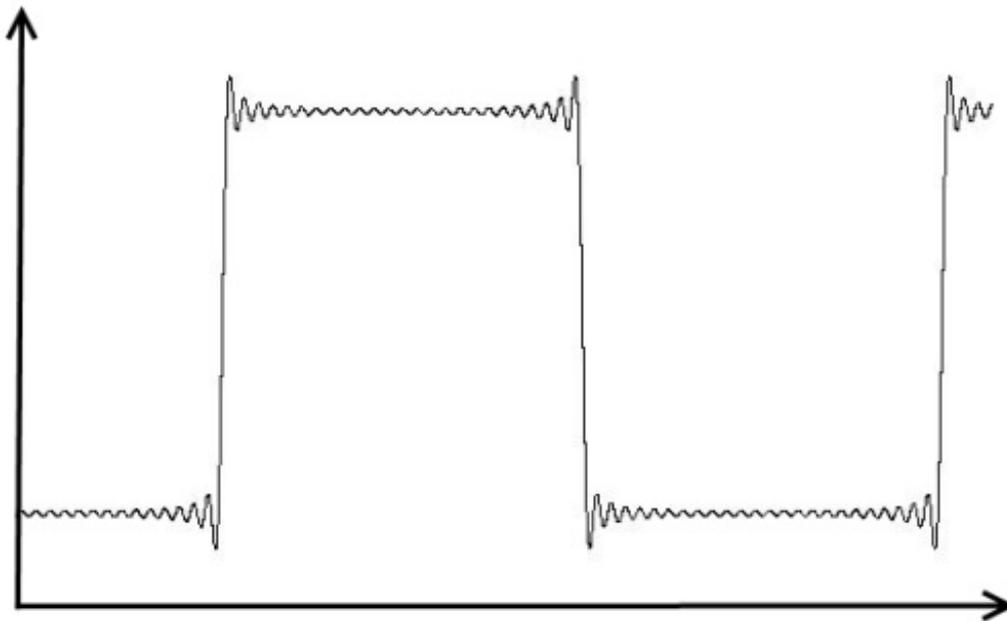


Figure 17 : signal déformé en sortie de l'amplificateur

Sur ce chronogramme, on voit bien que les harmoniques non amplifiées (atténuées) ont une influence sur le signal de sortie.



J'ai pris un cas simple, mais la distorsion a bien plus de facteurs que cela. Entre autre, la linéarité des composants et la qualité de l'amplificateur influent beaucoup sur le signal amplifié.

Bien. Maintenant que certaines bases sont posées, on va pouvoir commencer à voir ce qu'est l'Amplificateur Opérationnel.

## Partie 4 : [Théorie] Les composants à base de semi-conducteur

Dans cette partie, nous allons aborder le fonctionnement de composants à base de **semi-conducteurs**. Vous allez y découvrir des propriétés étonnantes dont les explications se font par un rapprochement au plus près de la matière ! Ne vous effrayez pas non plus, nous ne ferons pas de physique quantique et n'entrerons pas dans d'autres domaines bien trop au delà de votre niveau actuel. Nous resterons dans une certaine sphère de facilité où les explications seront les plus compréhensibles possibles pour appréhender cette nouvelle partie, somme toute, très différente des précédentes.

### Introduction aux semi-conducteurs

L'utilisation des propriétés des semi-conducteurs a révolutionné nos vies. Littéralement.

Vous avez souvent entendu :

"Le nouveau processeur de telle marque contient x millions de transistors".

Et bien un transistor est fabriqué à base de matériaux semi-conducteurs. Donc sans semi-conducteurs, pas de transistors, pas de processeur, pas d'ordinateur, de téléphone, de tablettes, de télévision, de SiteDuZero... J'évoque les processeurs, mais tous les circuits actifs actuels (analogiques comme numériques) sont fabriqués à base de semi-conducteurs. Toute l'électronique moderne les utilise. Sans eux, nous en serions certainement au calculateur 8 bit à lampes de la taille d'un hangar !

Vous comprenez bien qu'il nous faut en parler un peu, de ces fameux semi-conducteurs.

Ce chapitre contiendra des parties assez théoriques et qu'il ne sera pas nécessaire de retenir ; d'autres sections devront en revanche être bien comprises.

### Un semi... quoi ?

Vous savez qu'il existe des matériaux capables de conduire le courant électrique (comme le cuivre) et d'autres qui ne le peuvent pas (comme l'air, le bois, le plastique...). Les premiers sont bien sûr appelés **conducteurs** et les seconds **isolants**.

Découvrez aujourd'hui : les **semiconducteurs** !

Mais qu'est-ce que c'est que ce truc-là ?

D'abord, ce n'est pas un truc, mais un matériau. Et puis je vais vous expliquer.

Pour bien comprendre ce qui fait qu'un matériau est isolant, conducteur ou semiconducteur, il faut s'intéresser un peu à la théorie quantique.

### Un tout petit peu de physique quantique

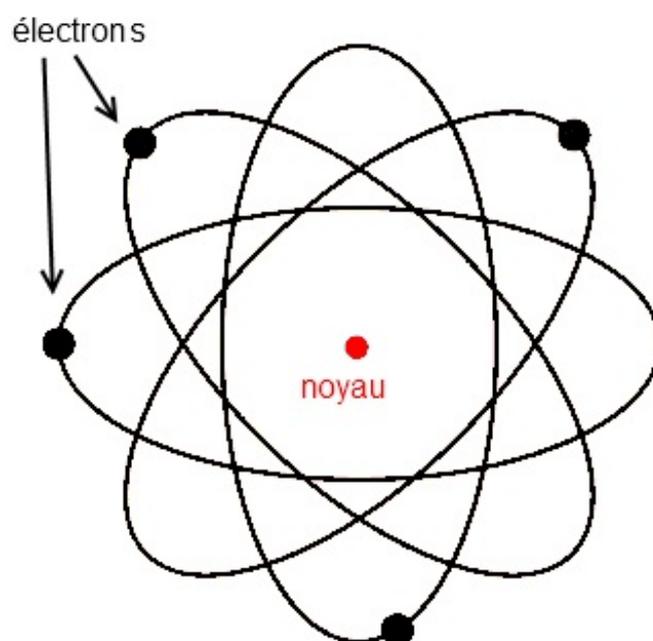
Zoomons un peu... Zoomons beaucoup même ! Jusqu'à l'échelle atomique ! 🤖

Un atome contient des nucléons (protons et neutrons) et des électrons. Les électrons gravitent autour d'un noyau de nucléons.

En théorie classique de la physique, ces orbites sont elliptiques (ou circulaire), selon le modèle de Bohr. Un atome ressemble à notre système solaire, avec pour Soleil le noyau de nucléons et pour planètes les électrons.

Dans la théorie quantique, les électrons n'occupent pas une place définie, mais ont une certaine probabilité d'occuper une région de l'espace autour du noyau ; cette probabilité est appelée orbitale atomique. Ces orbitales sont décrites par 3 nombres quantiques, qui définissent - avec un quatrième nombre appelé spin - l'état quantique de l'électron. Pour un état quantique donné, l'électron possède une énergie donnée, et dans un atome, il ne peut y avoir qu'un seul électron par état quantique.

Enfin, les états quantiques sont remplis par les électrons par énergie croissante. Pour l'atome d'hydrogène, ayant



un seul électron, un seul niveau d'énergie sera rempli (disons  $E_1$ ). Dans l'atome d'hélium, ayant 2 électrons, le niveau  $E_1$  sera rempli, puis le niveau  $E_2$  avec  $E_1 < E_2$ .

Ouf ! Tout est dit ! 🤖

A retenir :



- les électrons possèdent une énergie ;
- au sein d'un atome, deux électrons ne peuvent avoir la même énergie
- les orbitales atomiques sont remplies par les électrons par niveaux d'énergie croissants.

## Isolant, conducteur, semiconducteur

Maintenant que vous avez une vague idée du modèle quantique de l'atome, reprenons notre problématique : qu'est-ce qui rend un matériau isolant, conducteur, semi-conducteur ?

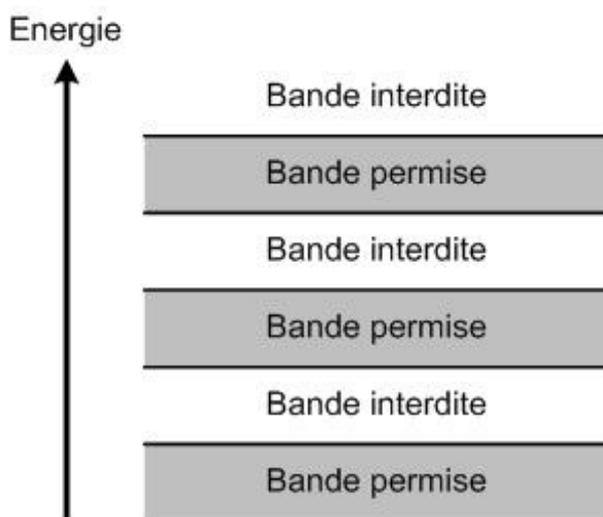
Pour cela, intéressons-nous aux valeurs que peut prendre l'énergie d'un électron.

### L'énergie d'un électron

Un électron isolé, détaché de tout atome ou de tout matériau peut prendre n'importe quelle valeur d'énergie.

Dans un atome, il ne peut prendre que des valeurs parfaitement définies, multiples d'un niveau fondamental, le **quantum**, défini par le physicien Max Planck.

Enfin, dans un solide - ce qui nous intéresse le plus - la situation est intermédiaire : l'énergie des électrons peut prendre toute valeur à l'intérieur d'un intervalle dépendant de la structure du matériau, on parle de **bandes d'énergie**. Il peut exister plusieurs bandes auxquelles l'énergie des électrons peut appartenir : ce sont les **bandes permises**. A l'inverse, il ne peut y avoir d'électrons dont l'énergie appartient aux **bandes interdites**.

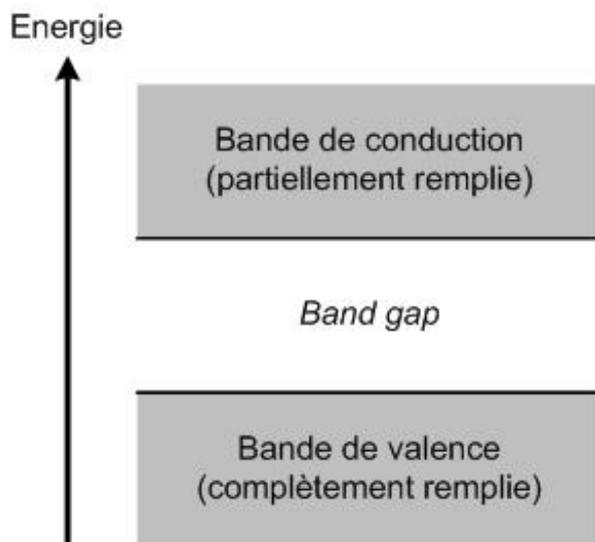


Chaque bande peut contenir un nombre précis d'électrons et, comme je l'expliquais dans le paragraphe précédent, les bandes sont remplies d'électrons par niveaux d'énergie croissant.

A l'état fondamental de la matière, c'est-à-dire quand la température tend vers le zéro absolu (0 Kelvin ou  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), deux bandes ont un rôle particulier :

- **la bande de valence** est la dernière bande d'énergie complètement remplie d'électrons ;
- **la bande de conduction** est la bande d'énergie supérieure ou égale à celle de la bande de valence, mais qui n'est pas remplie.

L'énergie qui sépare ces deux bandes est appelée **gap**, ou **band gap**.



Les électrons appartenant à la bande de valence permettent la cohésion locale d'un solide ou d'un matériau : ils interagissent avec les atomes voisins pour rendre la structure stable.

Les électrons de la bande de conduction sont eux dit **délocalisés** : ils peuvent se déplacer au sein du matériau, d'atome en atome, pour participer à la conduction électrique.

### *L'impact sur les propriétés des matériaux.*

Pour finalement savoir si un matériau est isolant, conducteur ou semiconducteur, il faut s'intéresser aux remplissages des bandes de valence et de conduction et à la taille du gap, à l'état fondamental de la matière.

- Si la bande de conduction est partiellement remplie, quelque soit la taille du gap, des électrons au sein du matériau participent à la conduction électrique : le matériau est **conducteur** ;
- Si la bande de conduction est vide :
  - si le gap est grand (plusieurs électrons-volt, voir ci-dessous), aucun électron du matériau ne peut participer à la conduction : la matériau est **isolant** ;
  - si le gap est suffisamment petit (de l'ordre de l'électron-volt), le matériau est, au repos, isolant. Mais la moindre excitation, thermique ou électrique, permet à certains électrons de la bande de valence de franchir le gap et le matériau devient conducteur. On parle alors de matériau **semiconducteur**.

Une dernière définition : lorsqu'un électron quitte la bande de valence pour la bande de conduction, on dit qu'il y a création d'un **trou** : c'est une lacune en charge négative, assimilable à une charge positive.

Ca n'a pas été facile, mais on y est arrivé ! 😊

Maintenant que vous savez ce que sont les matériaux semi-conducteurs, du moins en théorie, on va pouvoir s'amuser un peu avec !



L'électron-volt (ou eV) est une mesure physique d'énergie. Sa valeur correspond à l'énergie cinétique d'un électron accéléré sur l'action d'une différence de potentiel d'un volt.

$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Cette valeur en Joule n'est pas pratique à manipuler, c'est pourquoi, en physique du semi-conducteur, on utilise beaucoup l'unité eV.

## Les éléments semi-conducteurs

Toute cette petite démonstration est fort intéressante (j'espère 😊), mais concrètement, quels sont les éléments semi-conducteurs ?

### Dans le tableau périodique des éléments

Dans le tableau périodique des éléments, les semi-conducteurs se situent dans la colonne IV.



Tous les éléments de la colonne IV ne sont pas semi-conducteurs ! Cela dépend toujours de la largeur du gap au sein du cristal.

Le **Silicium**, l'élément semi-conducteur le plus courant, celui dont vous avez certainement déjà entendu parler, et qui constitue la base de la très grande majorité des circuits électroniques actuels, de symbole Si, est le composant de numéro atomique 14. Cela signifie qu'un atome de silicium est entouré de 14 électrons en tout.

La colonne IV est mise en valeur dans l'image qui suit, et plus particulièrement le Silicium, encadré en rouge.

La colonne IV dans le tableau périodique des éléments - Adapté de Wikipédia

Les atomes de la colonne IV comportent 4 électrons sur leur dernière couche électronique, pour un nombre supérieure de "places" (d'après des règles quantiques que je ne détaillerai pas - croyez-moi, ça marche 🤖).



Les atomes les plus stables comportent 8 électrons sur leur dernière couche. C'est le cas pour les gaz nobles (ou rares) de la colonne XVIII, la dernière, du tableau périodique. C'est aussi la raison pour laquelle certains éléments ont tendance à former des ions, plus stables que l'élément pur, ou que les atomes s'organisent en cristaux.

Les atomes semi-conducteurs peuvent s'ordonner en cristaux très compacts, et dans ces cristaux, les 4 places occupées se situent dans des niveaux d'énergie bas, et les places vacantes dans des niveaux plus élevés. Vous l'aurez compris, ce sont les bandes permises, et plus précisément, de valence et de conduction respectivement.

Une petite excitation (d'énergie supérieure à celle du gap) et les électrons migrent vers les niveaux plus élevés et rendent le cristal conducteur !

Quelques exemples de valeur de gap :

Largeur du gap (eV)	
Carbone diamant	5,3
Silicium	1,12
Germanium	0,72

D'après les critères que nous avons établi précédemment, le Silicium et le Germanium sont d'excellent semi-conducteurs.

Vous l'aurez remarqué, le carbone est dans la colonne IV et la valeur du gap montre qu'il est isolant.

Je l'ai bien précisé : les éléments de la colonne IV ne sont pas toujours des semi-conducteurs. Ils peuvent également être isolants, comme le carbone structure diamant.

En revanche, la structure graphite du carbone, celle de vos mines de crétin, est conductrice (vous pouvez donc utiliser vos mines comme fil électrique si vous le souhaitez, mais attention, elles ne sont pas isolées, et elles chauffent car leur conductivité reste médiocre et donc l'effet Joule important). Enfin, actuellement, beaucoup de recherches se font sur les *nano-tubes de carbone*, une structure de carbone semi-conducteur (conductrice ?).

A l'heure actuelle, le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium, pour une raison simple : son faible coût. Il est en effet présent à près de 25% dans la croûte terrestre, et est très facile à extraire et à traiter. Si vous ne vous rendez pas compte à quel point cet élément est abondant, imaginez-vous qu'il est le composant principal du verre. Pas convaincu ? Alors dites-vous que le sable de vos plages est composé à environ 25% de silicium pur ! Un château de sable = un ordinateur. 🤖

### Les semi-conducteurs composés

Certains cristaux composés de différents éléments peuvent également présenter des propriétés semi-conductrices. Il existe notamment des semi-conducteurs dits III-V et II-VI. Comme vous l'aurez deviné, ils sont, dans le premier cas composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique, et dans le deuxième cas composés d'éléments de la colonne II et de la colonne VI du tableau périodique.



Les colonnes II, III, V et VI dans le tableau périodique des éléments - Adapté de Wikipédia

L'association d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V (ou d'un élément de la colonne II et d'un élément de la colonne VI) *peut* engendrer un cristal électriquement neutre et aux liaisons atomiques stables puisqu'il y a, en moyenne, 4 paires d'électrons par atomes. Certains arrangements sont en plus semi-conducteurs.

Voici quelques exemples de semi-conducteurs composés :

Composés III-V		Composés II-VI	
Nom	Largeur du gap (eV)	Nom	Largeur du gap (eV)
Arséniure de gallium (GaAs)	1,424	Tellure de cadmium (CdTe)	1,44
Arséniure d'aluminium (AlAs)	2,12	Oxyde de zinc (ZnO)	3,43
Nitride de gallium (GaN)	3,43	Sulfure de zinc (ZnS)	3,54 ou 3,91 selon la structure cristalline
Phosphure de gallium (GaP)	2,66	Séléniure de zinc (ZnSe)	2,7
Nitride de gallium-aluminium (AlGaN)	4,5eV	Tellure de mercure-cadmium (HgCdTe)	0,5



La mesure des gaps de ces composés doit se faire empiriquement. Les valeurs données sont donc des valeurs de gaps à 300K (soit 25°C environ).

Vous pouvez le constater, les combinaisons sont nombreuses. Beaucoup de ces composés restent à l'heure actuelle des sujets de recherche, car ils sont difficiles et coûteux à fabriquer, et leurs propriétés et capacités encore mal maîtrisées. En outre, leur application est rarement l'électronique logique ou petit signal, mais bien souvent l'optoélectronique (diodes laser, photorécepteur...) ou l'électronique de puissance.

## Les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques

### Semi-conducteurs intrinsèques

#### Définition

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau semi-conducteur pur : le matériau est parfaitement régulier et ne contient aucune impureté.

Son comportement électrique ne dépend alors que de sa structure et de l'excitation thermique :

- à 0 K, le matériau est isolant ;
- plus on chauffe, plus le nombre d'électrons arraché à la bande de valence augmente et plus le matériau est conducteur.

#### Inconvénients

D'abord, les semi-conducteurs intrinsèques sont purement théoriques : aucune technique actuelle ne permet de fabriquer des cristaux parfaitement réguliers et parfaitement monoatomique.

Ensuite, et surtout, les semi-conducteurs intrinsèques ne sont pas intéressants car ils présentent une conductivité très faible, à moins d'être portés à très très haute température.

Cette propriété est fondamentale : pour l'industrie microélectronique, il n'est pas intéressant de chercher à fabriquer de semi-conducteurs intrinsèques, aux propriétés électroniques déplorables ; il est bien plus intéressant de contrôler le niveau d'impuretés dans le matériau pour lui donner des caractéristiques exploitables. On parle alors de **dopage**.

## Le dopage chez les semi-conducteurs extrinsèques



Nos semi-conducteurs prennent de l'EPO ?

Mais non, le dopage est une technique qui permet à nos semi-conducteurs de "semi-conduire" plus efficacement.

Nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, le semi-conducteur intrinsèque n'est pas exploitable. Pour pallier ces contraintes, des "impuretés" sont introduites au sein du solide lors de sa fabrication.

Ces impuretés introduites sont des atomes choisis pour leur propriétés physico-chimiques.

### *Prenez 1g de Silicium, ajouter 100mg de Gallium...*

La recette utilisée lors de la fabrication d'un matériau semi-conducteur extrinsèques est extrêmement importante 🤪. La quantité d'impuretés notamment influe beaucoup sur les propriétés du solide.

De manière générale, les impuretés restent très peu nombreuses par rapport au cristal pur.

Prenons l'exemple du Silicium, le semi-conducteur le plus utilisé à l'heure actuelle.

Un cristal de Silicium pur contient environ  $5 \cdot 10^{22}$  atomes par  $\text{cm}^3$ . Lors de la fabrication de Silicium extrinsèque, on ajoute entre  $10^{16}$  et  $10^{22}$  impuretés par  $\text{cm}^3$ , soit 1 impureté pour 100 à un million d'atomes de Silicium.

Si les impuretés sont trop nombreuses (plus d'une impureté par atome de semi-conducteur intrinsèque), le solide est dit **dégénéré**, et ses propriétés sont difficilement utilisables.

Dans le reste de cette partie, on ne considérera que des semi-conducteurs non dégénérés.

### *L'influence des impuretés*

Ces impuretés, avec leur cortège électronique, introduisent au sein du matériau de nouveaux niveaux d'énergie. Si ces niveaux se trouvent dans les bandes permises du semi-conducteur intrinsèque, les impuretés n'ont aucun impact sur les propriétés du semi-conducteur ; tout se passe comme si elles n'existaient pas. En revanche, si les niveaux se trouvent dans la bande interdite, les impuretés modifient considérablement les propriétés du semi-conducteur.

Si celui-ci n'est pas dégénéré, il est dit **dopé** et les impuretés sont appelées **dopants**.

## Propriétés des dopants

Souvenez-vous qu'un cristal de semi-conducteur intrinsèque est, à l'état fondamental, électriquement neutre, car les 4 électrons de la couche externe appartiennent à la bande de valence. Ils assurent la cohésion du cristal : avec leurs petits bras musclés, les électrons d'un atome tiennent la main aux électrons des autres atomes autour pour que la structure reste stable. 🤪 Plus sérieusement, les atomes mettent les électrons de leur bande de valence en commun, ils se les partagent, de façon à avoir 8 électrons sur leur couche externe, la configuration la plus stable qui soit (j'avais déjà fait une remarque là-dessus 🤪).

On introduit alors des dopants, qui n'ont pas le même nombre d'électrons sur leur couche de valence.

S'ils en ont plus, 4 de ces électrons vont se lier avec leur petits copains des atomes de silicium autour d'eux, bien plus nombreux, et les autres resteront libres autour de l'atome. Le cristal ne sera donc plus neutre, mais possédera un excédent d'électrons.

A l'inverse, si le dopant a moins de 4 électrons sur sa couche de valence, ces 1, 2 ou 3 électrons se lieront tant bien que mal aux atomes autour, mais un ou des électrons des atomes de silicium seront orphelins. Encore une fois, le cristal ne sera plus neutre, mais présentera un manque d'électrons.



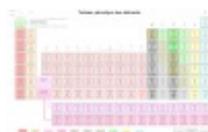
**On ne peut pas utiliser n'importe quel atome pour doper un semi-conducteur !**

Les dopants sont choisis pour les niveaux électroniques qu'ils introduisent au sein du cristal, et aussi pour leur habilité à ne pas déstabiliser la structure cristalline du matériau et en altérer les propriétés mécaniques. Ainsi, on ne peut pas se permettre d'utiliser des éléments possédant plus d'un électron en plus ou en moins que le silicium.

## Les différents dopages

Il existe donc deux types de dopants, donnant au semi-conducteur des propriétés électroniques différentes :

- des dopants appartenant à la colonne III du tableau périodique, possédant un électron de moins que le silicium ;
- des dopants appartenant à la colonne V du tableau périodique, possédant un électron de moins que le silicium.



Les éléments dopants

### *Dopage de type N*

Le dopage de type N consiste à introduire dans le cristal de semi-conducteur des atomes appartenant à la colonne V, qui possèdent donc 5 électrons sur leur couche de valence. On appelle ces éléments des dopants N.

Lorsqu'un dopant N et un semi-conducteur comme le silicium entre en contact, ils cherchent à partager des paires d'électrons. Ils peuvent ainsi partager chacun 2 paires d'électrons, pour posséder chacun 8 électrons sur leur couche externe.

Un électron du dopant est donc orphelin : il ne peut être partagé, et il ne peut occuper la bande de valence (elle est remplie). Il quitte donc l'atome et devient un électron libre - ou délocalisé -, capable de conduire le courant.

Le cristal présente donc un excès d'électrons, chargés négativement. Le semi-conducteur est donc dit **dopé N**, N pour Négatif.

### *Dopage de type P*

Le dopage de type P consiste lui à introduire dans le cristal des atomes appartenant à la colonne III, qui possèdent 3 électrons sur leur couche de valence.

Dans le cristal, les atomes de silicium et de dopants P présentent alors 7 électrons sur leur couche externe. Il manque un électron sur cette couche. Cette absence d'électrons, et donc de charge négative, est considéré comme une charge positive, ou **trou**.

Cette nouvelle structure peut également conduire le courant. En effet, sous l'action d'un échauffement, d'une différence de potentiel..., un atome en manque d'électron peut en recevoir un d'un autre atome, qui devient alors déficitaire en électron. Il y a eu un mouvement d'électron d'un atome vers un autre (ou un mouvement de trous dans l'autre sens), par définition, un courant électrique.



**Un trou est considéré comme une charge positive, de même masse qu'un électron. Pourtant, un trou n'a aucune réalité physique. Il modélise uniquement une absence d'électron.**

Finalement, le cristal présente donc un défaut d'électrons, ou un excès de trous, chargés positivement. Le semi-conducteur est donc dit **dopé P**, P pour Positif.



Lorsqu'un semi-conducteur N (respectivement P) contient une importante proportion de dopants, sans être pour autant dégénéré, il est dit dopé N<sup>+</sup> (respectivement P<sup>+</sup>).



Une structure qui possède des électrons en trop, une autre à qui il en manque... Et si on les met en contact, ça fait quoi ?

Excellente question ! C'est ce que nous allons aborder à présent !

## La jonction PN

### Que se passe-t-il à une jonction PN ?

#### Définition

Une jonction PN représente la mise en contact d'une surface de cristal de semi-conducteur dopé P avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé N. Cette structure permet de réaliser des diodes, dont vous verrez le fonctionnement et l'utilité dans un prochain chapitre.

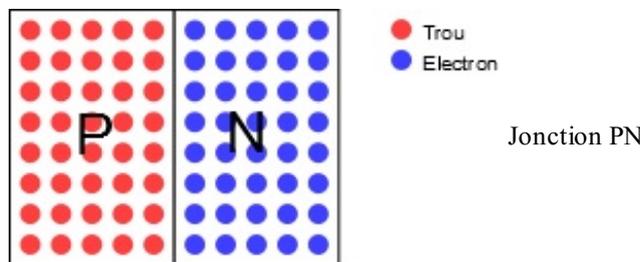


Comme je vous le disais à la fin de la partie précédent : lorsqu'un semi-conducteur N (respectivement P) contient une importante proportion de dopants, sans être pour autant dégénéré, il est parfois dit dopé N<sup>+</sup> (respectivement P<sup>+</sup>). Cette distinction est souvent utilisée au niveau des jonctions, pour distinguer une partie plus dopée qu'une autre. On parle alors de jonction P<sup>+</sup>N ou PN<sup>+</sup>.

#### Phénomène de diffusion

Intéressons-nous pour le moment à une jonction PN simple, sans quantification du dopage.

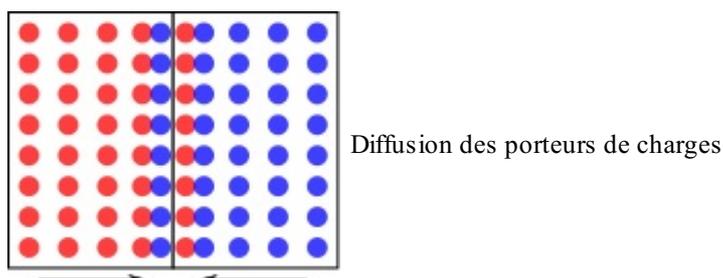
Pour vous représenter la structure, voici une (jolie ?) image :



Nous avons donc :

- à gauche, une zone P, contenant des trous.
- à droite, une zone N, contenant des électrons libres.

Lorsque les deux surfaces sont mises en contact, une partie des trous et des électrons se diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction :



A la jonction, un peu à gauche et un peu à droite, les porteurs de charges, c'est-à-dire les électrons et les trous, se neutralisent. A l'équilibre, il existe donc une zone sans charge mobile, appelée **zone de déplétion** ou (plus souvent) **zone de charge d'espace**

(abrégée ZCE) ; une différence de potentiel entre la zone N et la zone P, appelée **potentiel de jonction** apparaît également à l'équilibre. Pour les diodes à base de Silicium, ce potentiel est de l'ordre de 0,6V.

La ZCE peut être plus large d'un côté ou d'un autre selon les concentrations relatives en électrons et en trous. Si les trous sont en plus grandes proportions que les électrons, ils se diffuseront plus et la ZCE sera plus large dans la zone N que dans la zone P. Inversement, si les électrons sont majoritaires par rapport aux trous, la ZCE sera plus large dans la zone P que dans la zone N.

Si les zones N et P sont de très bons conducteurs (comment ça pourquoi ? je viens de vous l'expliquer ! :), on se trouve ici à la jonction avec une zone sans porteur de charge, et donc quasiment isolante.



Ça veut dire quoi "quasiment isolante" ?

Excellente question ! En réalité, la ZCE agit comme une résistance. Plus la ZCE est large, plus la résistance est grande. A l'inverse, plus la ZCE est étroite, plus la résistance de la jonction est faible.

Et ce qu'il y a d'intéressant, c'est que la largeur de la ZCE ne dépend pas seulement des concentrations des porteurs de charge, mais aussi de la **polarisation de la jonction**.

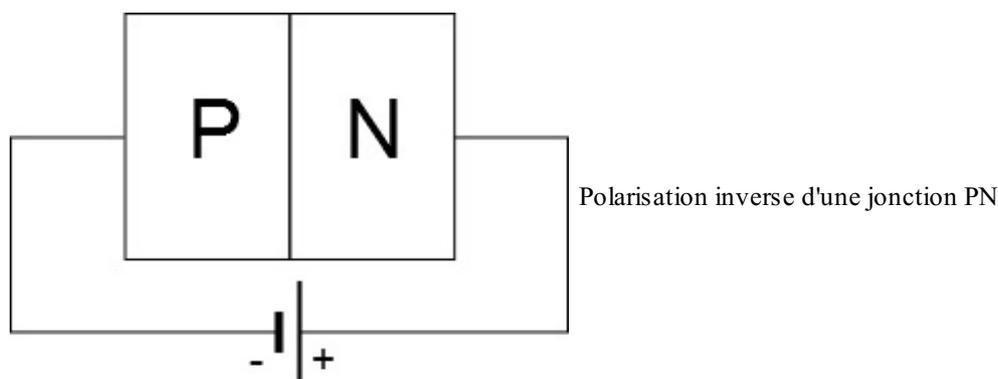
## Polarisation d'une jonction et application

D'abord, qu'est-ce que la polarisation d'une jonction ? Il s'agit tout simplement du branchement d'un générateur de tension de part et d'autre de la jonction.

Il est parfaitement possible de relier la borne positive du générateur à la zone P et la borne négative à la zone N, tout comme faire l'inverse. Selon le sens du branchement, on parlera de polarisation directe ou polarisation inverse, et le comportement de la jonction sera complètement différent.

### *Polarisation inverse*

On dit que la jonction est polarisée en inverse lorsque le pôle positif du générateur est connecté à la zone N de la jonction et que le pôle négatif est connecté à la zone P :



Au moment où on connecte le générateur, une partie des électrons de la zone N se détache et est attirée vers la borne + du générateur. Au même moment, des électrons sont émis par la borne négative du générateur et se combinent avec des trous de la zone P.

Mais le nombre de trous dans la zone P est limité et il n'existe pas de trous dans la zone N pouvant migrer dans la zone P pour remplacer ceux qui ont disparu. Les électrons cessent donc de migrer de la borne - du générateur vers la zone P. De même, le nombre d'électrons dans la zone N est limité et il n'existe pas d'électrons dans la zone P pouvant migrer vers la zone N pour remplacer ceux qui ont disparu. Les électrons cessent donc de migrer de la zone N vers la borne + du générateur.

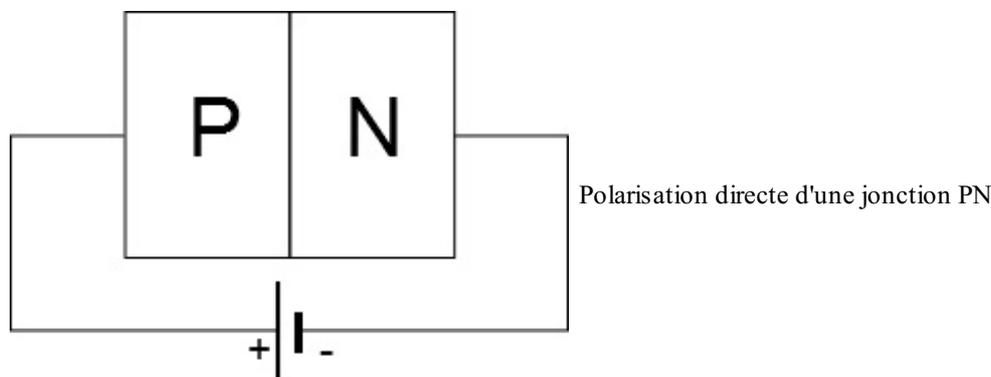
**Finalement, aucun courant ne circule dans le circuit lorsqu'il est polarisé en inverse. La jonction est dite bloquée.**



En réalité, il existe une infime quantité de trous dans la zone N et une infime quantité d'électrons dans la zone P, et il existe un courant inverse. Mais celui-ci est extrêmement faible, de l'ordre du nano-ampère, soit du milliardième d'ampère, et il est donc souvent négligé.

### Polarisation directe

On dit que la jonction est **polarisée en direct** lorsque le pôle positif du générateur est connecté à la zone P de la jonction et que le pôle négatif est connecté à la zone N :



Au moment où on connecte le générateur, les électrons de la zone N et les trous de la zone P convergent vers la jonction sous l'effet de la force électromotrice du générateur. A la jonction, les trous et les électrons se combinent et disparaissent.

Néanmoins, les électrons libres de la zone N qui disparaissent sont continuellement remplacés par d'autres électrons provenant de la borne négative du générateur. De la même façon, les trous de la zone P qui disparaissent sont remplacés par d'autres en provenance de la borne + du générateur.



Souvenez-vous que les trous ne sont qu'un modèle. Un courant est physiquement un flux d'électrons dans un certain sens, et peut être **modélisé** par un flux de trous dans le sens inverse. Si vous préférez ne vous représenter que des électrons, imaginez que le générateur "aspire" des électrons dans la zone P, et laisse donc des trous.

Il existe finalement un flux continu des charges dans le circuit : **un courant continu s'établit dans un circuit polarisé en direct.**

On appelle **courant direct  $I_d$**  le courant dans le cristal et **tension directe  $V_d$**  la tension du générateur à l'origine de l'apparition de  $I_d$ .



Mais ne faut-il pas prendre en compte le potentiel de jonction ?

Je félicite ceux qui se seront posés la question ! L'explication précédente est en fait une simplification (généralement suffisante) du comportement réelle des jonctions.

Souvenez-vous qu'à l'équilibre, il existe une différence de potentiel entre les zones N et P, d'environ 0,6V pour les jonctions à base de silicium.

Or en polarisation directe, nous appliquons une différence de potentiel dans l'autre sens. Que se passe-t-il donc si la tension du générateur est inférieure au potentiel de jonction ?

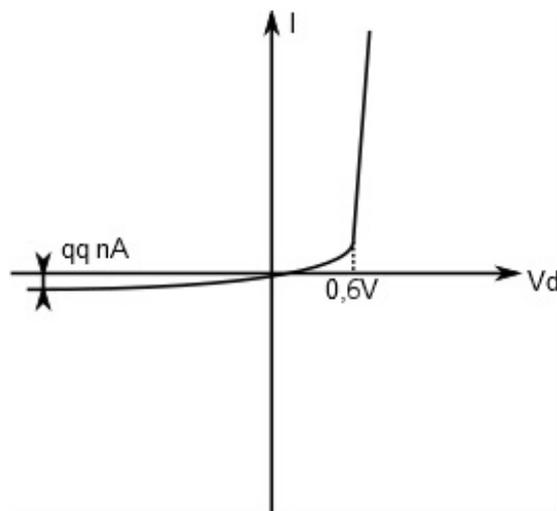
La réponse est simple : tant que  $V_d$  est inférieure à 0,6V, la jonction reste bloquée, car le générateur ne fournit pas assez d'énergie aux porteurs pour générer un courant.

### Conclusion

Une jonction PN :

- bloque le courant si elle est polarisée en inverse ;
- permet le passage du courant pour une polarisation directe supérieure au potentiel de jonction.

Voici finalement la caractéristique d'une jonction PN :



Caractéristique d'une jonction PN simple à base de Silicium

L'explication des différentes courbures nécessite d'entrer beaucoup plus en profondeur dans la théorie des semi-conducteurs. Si vous ne retenez que l'allure de cette caractéristique, cela vous suffira pour comprendre l'immense majorité des circuits contenant des diodes.



#### Des diodes ?

Et oui ! En réalité, une jonction PN *est* une diode. 😄 Vous verrez dans la partie suivante comment les utiliser. Et dans une autre partie, vous ferez connaissance avec les transistors NPN et PNP. Vous le devinez : ce ne sont "que" deux jonctions tête bêche ! Mais chaque chose en son temps...

Dans ce long chapitre, vous vous êtes familiarisés avec la théorie des semi-conducteurs. La mise en place d'une telle théorie n'est pas chose aisée. J'espère avoir été le plus clair possible.

Quoi qu'il en soit, ne vous inquiétez pas si vous n'avez pas absolument tout retenu. Essayez de comprendre le fonctionnement des jonctions, c'est ce qui vous sera le plus utile pour la suite du cours.

Bon courage, les choses sérieuses commencent ! 😊

## La diode

Dans ce chapitre, nous allons nous éloigner légèrement des phénomènes que l'on a vus jusqu'à maintenant et nous diriger vers une branche incontournable de l'électronique : les semi-conducteurs...

### La diode

Au temps de notre aire technologique, nous sommes fréquemment en présence d'une électronique bien particulière qui nous permet de jouir de ses bienfaits. Pour exemple, quelque chose de devenu complètement anodin : la lumière qui s'allume automatiquement avec la détection de présence.

Eh bien, imaginez seulement que vous disposiez d'un tel système dans vos toilettes ! Vous ouvrez la porte pour entrer dans vos toilettes et la lumière s'allume ! 🧙‍♂️ Quel bonheur ! Mais le pire est à venir, car le contraire serait fâcheux ! Oui, dès lors que vous allumeriez la lumière la porte s'ouvrirait d'un seul coup et c'est la honte assurée ! 😬

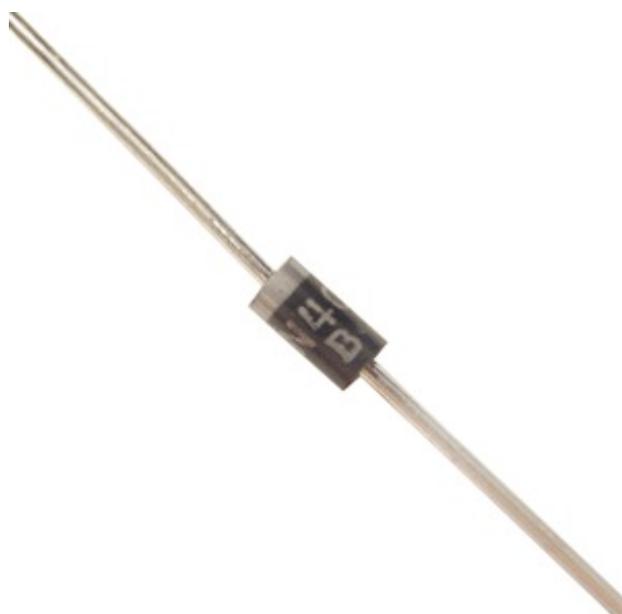
Afin de résoudre ce genre de problème (en réalité celui-ci n'existe pas, c'est un exemple pour bien vous montrer l'utilité de ce qui suit), les électroniciens ont inventé : la **diode**.

### Qu'est-ce que la diode ?

Une diode possède deux bornes : c'est un dipôle. Plus précisément, la diode est un dipôle passif non-linéaire et non-symétrique.

L'intérêt principal de la diode, comme nous l'avons vu dans le chapitre sur les jonctions PN, est de ne laisser passer le courant que dans un sens, et pas dans l'autre. Ci-contre, vous pouvez admirer un modèle de diode extrêmement courant : la diode Silicium 1N4004.

Jusqu'à présent nous n'avons vu que des composants linéaires, c'est-à-dire qui ne modifiaient que l'amplitude ou la phase d'un signal appliqué à son entrée. Le comportement de la diode est donc une nouveauté pour nous.



### Avant de commencer

#### Analogie : un clapet

L'analogie des fluides avec l'électronique est pratique car utilisable pour comprendre plusieurs phénomènes.

Pour ceux qui habitent près de marais salants, n'avez-vous jamais remarqué des espèces de "portes" qui séparent la mer des marais ? Ces portes permettent la régulation du niveau de l'eau dans le marais. Explications.

Lorsque l'eau du marais a un niveau plus élevé que celui de la mer, la porte s'ouvre pour laisser s'écouler ce surplus d'eau. A l'inverse, si le niveau de la mer est plus élevé que celui du marais, la porte se ferme pour éviter de retrouver ce surplus d'eau. Ce système agit donc comme un clapet qui laisse passer le courant hydraulique dans un sens unique.

Eh bien le fonctionnement des diodes est similaire à celui-ci. Si vous avez compris ce passage, alors vous avez tout compris (ou presque) !

### Symbole

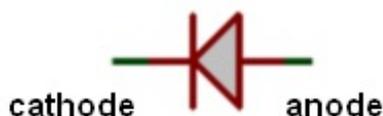
Les normes européenne et américaine adoptent le même et unique symbole pour la diode :



## Polarité

La diode possède deux bornes qui ont chacune un nom pour repérer le sens. Il s'agit de : l'**anode** et de la **cathode**, souvent désignées respectivement par A et K.

Sur le symbole, la cathode est la borne représentée par la barre verticale :



Rappelez-vous les jonctions PN. L'anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N.

## Régime continu

### Utilisation

Vous avez vu dans le chapitre précédent comment fonctionne un diode à l'échelle atomique. Maintenant, il va falloir apprendre à s'en servir ! Et rien de plus simple à l'horizon ! 😊

### Sens interdit

Vous vous souvenez de l'analogie que j'ai faite avec les marais ? Eh bien c'est ici l'occasion de mettre en pratique ce que j'avais expliqué.

La diode agit comme un clapet qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens. Regardez plutôt :

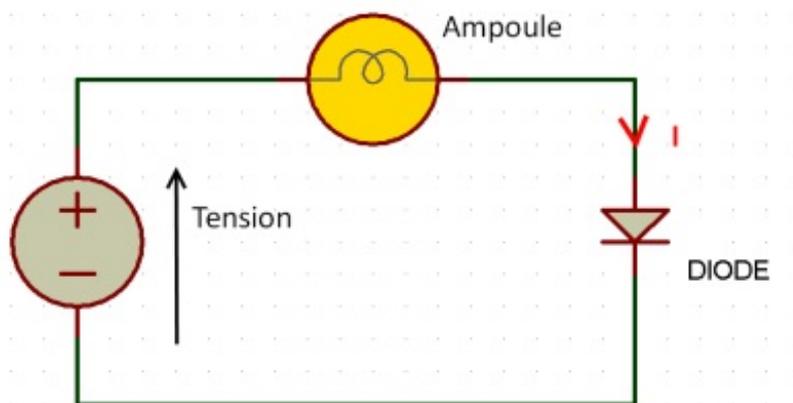


Figure 1 : diode polarisée correctement

La diode étant polarisée en direct, un courant circule, et donc l'ampoule s'allume.

Si on inverse le sens de la diode, celle-ci est alors polarisée en inverse. Aucun courant ne circule et la lampe reste éteinte :

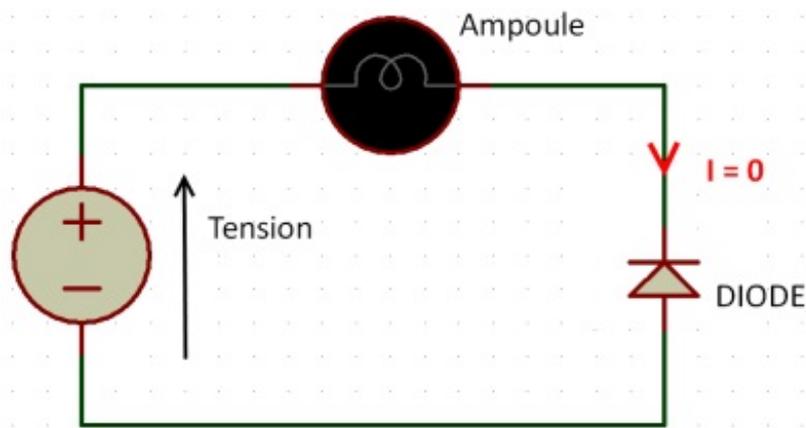


Figure 2 : polarisation inverse de la diode, l'ampoule reste éteinte



Pourquoi ça fonctionne ?

Tout est question de potentiel... Appelons  $U_A$  et  $U_B$  les potentiels respectivement à l'anode et à la cathode de notre diode :

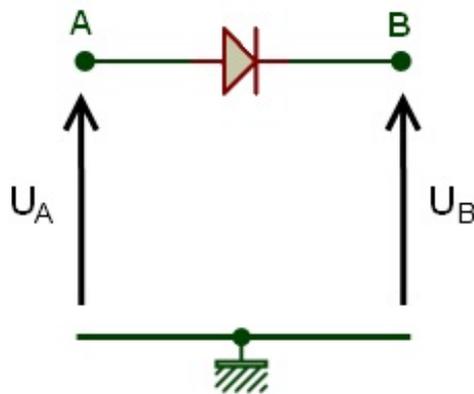


Figure 3 : potentiels aux bornes d'une diode

Pour que la diode soit passante, il suffit que le potentiel  $U_A$  soit supérieur au potentiel  $U_B$ . Inversement, pour que la diode soit bloquée, le potentiel  $U_B$  doit être plus grand que le potentiel  $U_A$ .



C'est simple, mais attention : la diode a une caractéristique que nous allons voir maintenant et qui modifie légèrement ce que je viens de dire. Rappelez-vous du potentiel de jonction...

## Caractéristiques

### Tension de seuil

Lorsque vous soufflez dans un ballon de baudruche, vous devez vaincre son élasticité afin de le remplir d'air. Il en est de même pour la diode. (Non, ne soufflez pas dans la diode ça ne sert à rien et en plus vous paraîtrez pour un(e) idiot(e) 🤪)

Pour que la diode devienne passante il faut que le potentiel  $U_A$  soit supérieur au potentiel  $U_B$  d'une valeur correspondant au type de diode utilisé :

$$U_A > U_B + U_{\text{seuil}}$$

On appelle cette tension : **tension de seuil**. On dit aussi que la diode a un **seuil de polarisation**. Pour les diodes au silicium, la tension de seuil est en moyenne de 0,6V ; pour les diodes au germanium, elle est de 0,25V.



La tension de seuil d'une diode est l'exact équivalent du potentiel de jonction d'une jonction PN.

Donc si j'utilise une diode au silicium (ce qui est vrai dans la quasi-totalité des cas), pour que la diode soit passante, il faut que :

$$U_A > U_B + U_{seuil}$$

$$U_A > U_B + 0,6V$$



Il est très important de raisonner avec le potentiel lorsque l'on voit un montage qui utilise une ou plusieurs diodes. On évite ainsi bien souvent des erreurs ! 😊

Voici la caractéristique d'une diode polarisée en direct. On voit que le courant commence à croître dès la tension de seuil passée :

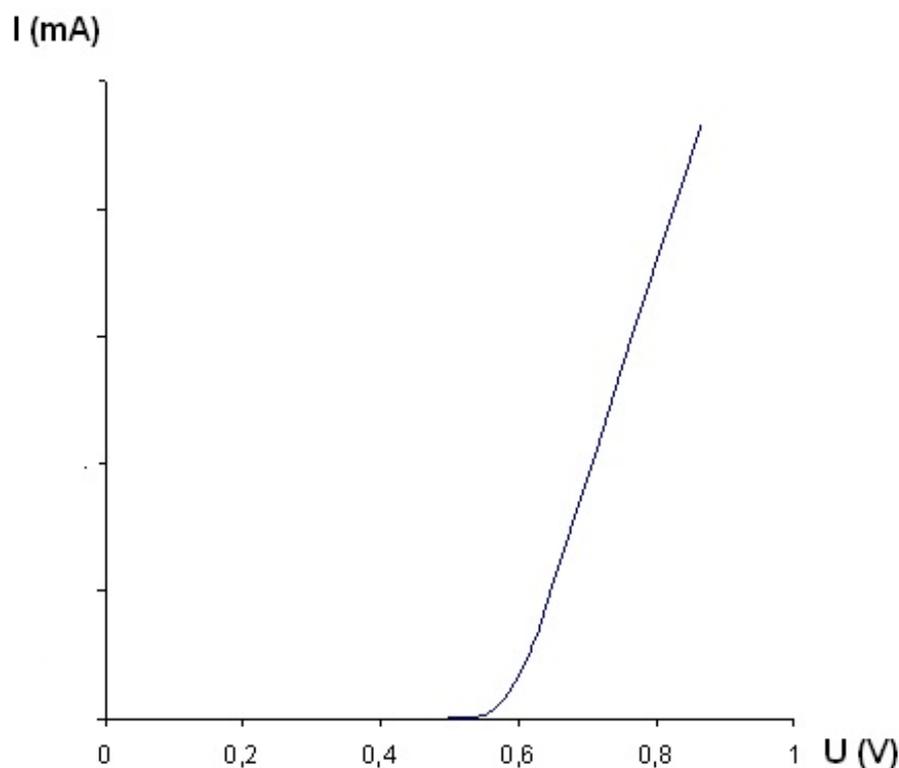


Figure 4 : tension de seuil d'une diode (au silicium) polarisée en direct

### Courant de fuite

Lorsque l'on polarise une diode en inverse, elle bloque le courant mais possède un léger défaut qui se nomme le **courant de fuite**. En fait, la diode laisse passer une infime partie du courant qui lui est admis en inverse. Autrement dit, elle ne bloque pas parfaitement le courant. Ce courant est tellement faible (quelques nano-ampère  $nA$ ) qu'il est négligé dans quasiment la totalité des cas.

### Tension de claquage

La **tension de claquage** est la tension pour laquelle la diode "claque" ou "grille" car la polarisation inverse a été trop forte. Heureusement, la diode ne claque pas dès qu'on la branche à l'envers puisque son but est justement d'éviter les inversions de polarité dans des montages (c'est un exemple, la diode a en effet plus de raison d'être utilisée que ça). Elle possède donc une tension de claquage qui se situe très haute pour certaines : elle est de l'ordre de 1000V, pour d'autre elle est de 60V. Tout dépend des caractéristiques de la diode choisie.

Voici la caractéristique d'une diode ayant une tension de claquage de 800V :

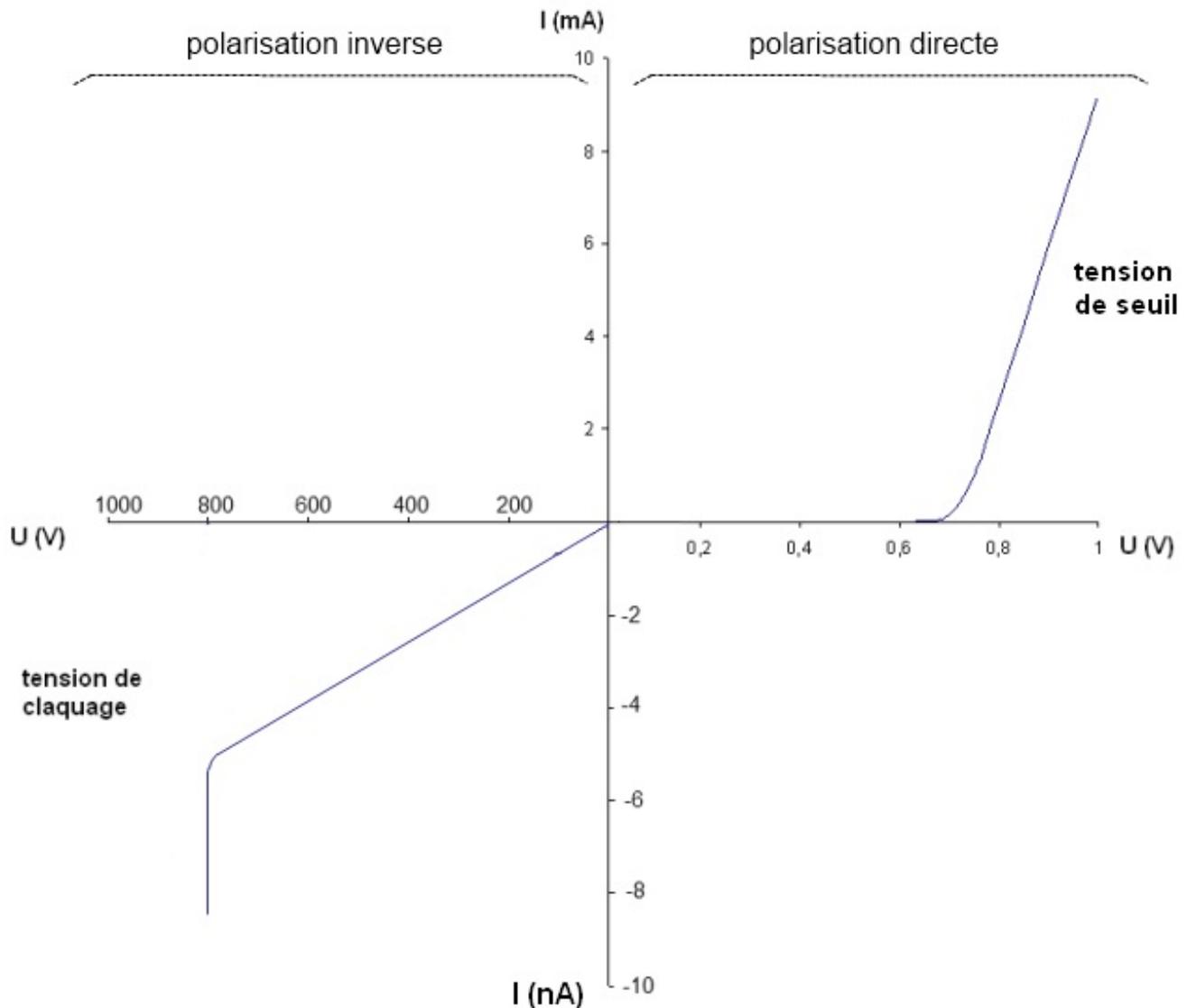


Figure 5 : fonction de transfert d'une diode (les valeurs ne sont pas à prendre en compte, seul l'ordre de grandeur est important)

Sur ce graphique, on peut visualiser la tension de claquage et la tension de seuil. Attention cependant aux échelles qui sont différentes sur chaque axe !



Eh oui ! C'est la même chose qu'une jonction PN ! 😊

### Régime variable

Là, ça va être très simple : **la diode a un comportement identique, que ce soit en régime continu ou en régime alternatif**. Bon, nous allons quand même voir quelques fonctions réalisées par la diode en ce régime. Cette fois c'est bien du régime variable dont je vais parler, celui qui englobe le régime alternatif, périodique et quelconque.

### Suppression d'alternance

Nous avons vu que la diode ne laissait passer le courant que si elle est polarisée en direct. Et bien que se passe-t-il si on lui fournit un signal alternatif ? 😊

Soit le montage suivant :

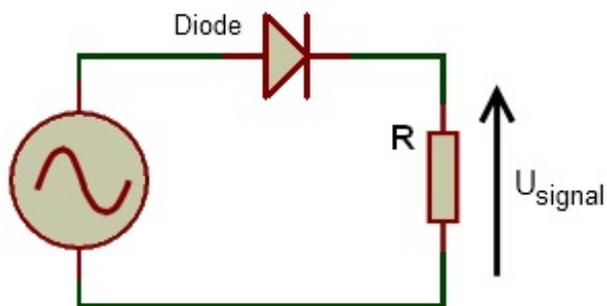


Figure 6 : diode en régime variable - polarisation directe

Le signal appliqué aux bornes de la diode (et du résistor) est sinusoïdal (il pourrait très bien être carré, triangulaire ou quelconque ; ce qui importe c'est le principe) :

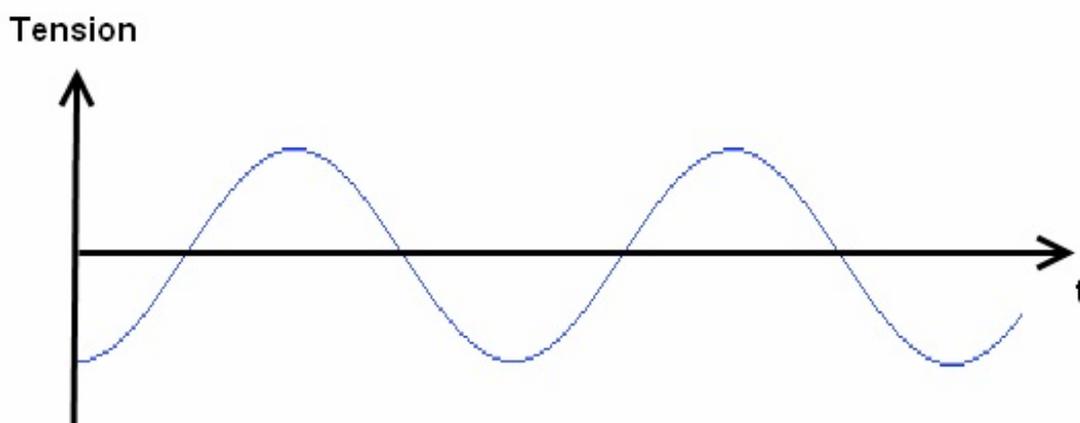


Figure 7 : signal à appliquer au montage

A votre avis et d'après ce que je viens de vous apprendre, quelle sera l'allure du signal aux bornes du résistor ?

**Secret** (cliquez pour afficher)

J'espère que vous avez cherché au moins !

Réponse :

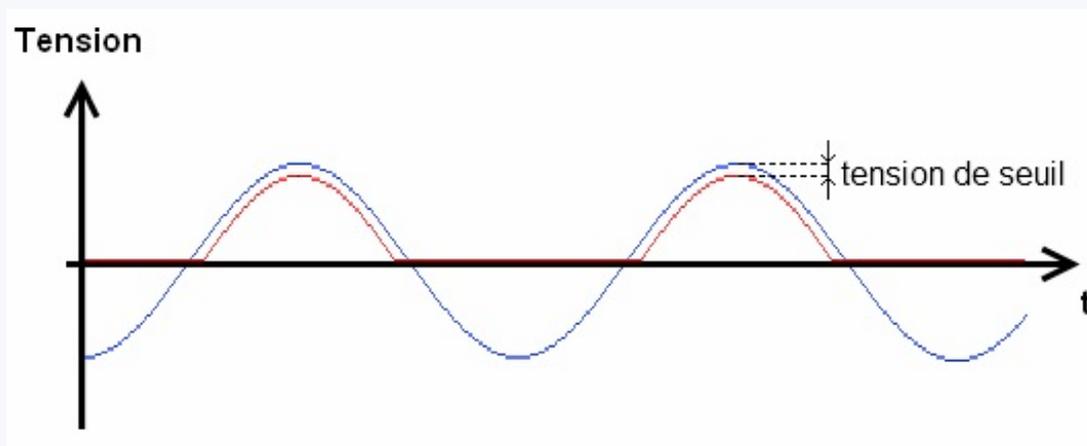


Figure 8 : signal appliqué à la diode, en bleu ; signal aux bornes du résistor, en rouge



Pourquoi le signal a cette forme ?

Pour répondre, il faut utiliser ce que l'on a vu précédemment. Analysons un peu.

**1<sup>ère</sup> observation :**

Les alternances négatives du signal de départ (signal bleu) ont disparu. La diode les a en effet bloquées car elle a eu à ce moment un potentiel plus élevé sur sa cathode que sur son anode :

$$U_{cathode} > U_{anode}$$

Par exemple, imaginons que la tension varie entre 5 et -5V. On sait tous que 0 (zéro) est supérieur à n'importe quel nombre négatif, donc :

$$0V > -5V$$

La diode est par conséquent bien bloquée.

**2<sup>ème</sup> observation :**

Concentrons-nous sur les alternances positives. Le seuil de la diode (ici au silicium) joue un rôle sur la forme finale du signal. Ceci toujours à cause des potentiels. On a vu précédemment que le potentiel sur l'anode de la diode doit être supérieur au potentiel sur sa cathode plus la tension de seuil de la diode :  $U_A > U_B + U_{seuil}$  pour que celle-ci devienne passante.

Dans notre cas, on a :

$$U_A > U_B + U_{seuil}$$

$$U_A > 0V + 0,6V$$

$$U_A > 0,6V$$

Donc, il faut que le potentiel sur l'anode de la diode soit d'au moins 0,6V pour que celle-ci devienne passante. Et c'est le cas lorsque le signal commence à "monter" et dépasse ce seuil.

La diode a supprimé l'alternance négative du signal.



En conclusion : retenez bien que pour comprendre un montage contenant des diodes, il est impératif de raisonner avec les potentiels !



Et si on branche la diode dans l'autre sens ?

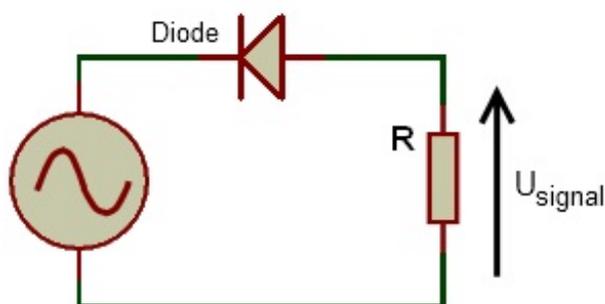


Figure 9 : diode en régime variable - polarisation inverse

Comme ceci ? A votre avis ? 🤖

**Secret (cliquez pour afficher)**

Réponse :

Il va se passer exactement la même chose que précédemment, mais le signal aura "perdu" ses alternances positives : il ne lui

reste que les alternances négatives :

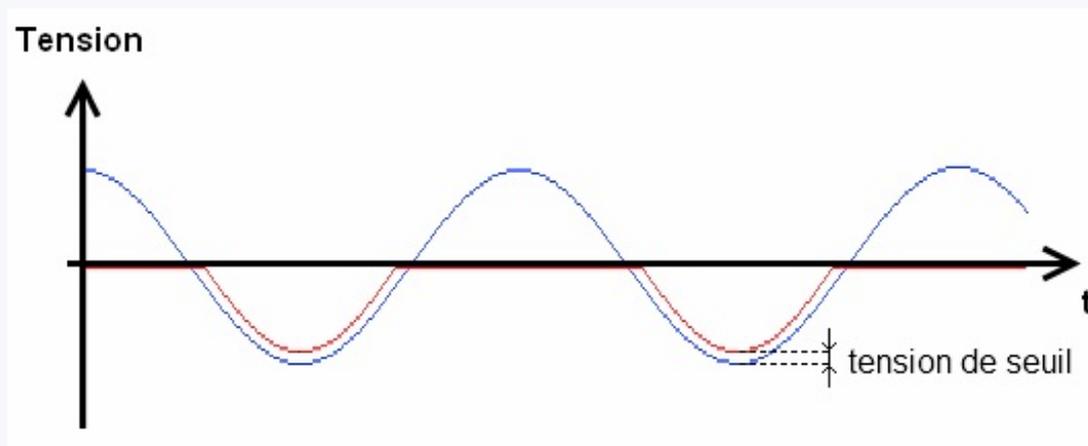


Figure 10 : signal appliqué à la diode, en *bleu* ; signal aux bornes du résistor, en *rouge*

(Je vous dispense des explications, en espérant que vous avez compris le principe 🤔)

## La diode Zener

### Préambule



Une diode Zener, c'est quoi ?

La diode Zener est une diode similaire à la diode standard. Elle ne conduit que dans un sens unique et dispose d'une tension de seuil. Bon, quel intérêt alors ? Eh bien son utilisation n'est fait qu'en la branchant "à l'envers". Ce que l'on cherche, c'est la tension de seuil inverse de la diode Zener.



Mais, tu ne nous as pas dit qu'une diode grille lorsqu'elle est branchée à l'envers ?

Euh, pas exactement. Ce que j'ai dit, c'est qu'une diode standard peut-être connectée à l'envers, mais qu'il ne faut pas lui appliquer une tension inverse plus grande que sa tension inverse supportée. Or, c'est justement ce que l'on recherche avec une diode Zener. En effet, une diode Zener s'utilise en polarisation inverse et lorsqu'on lui applique une tension supérieure à la tension inverse qu'elle peut supporter : elle claque !

Mais alors, quel intérêt si l'on ne peut l'utiliser que pour une unique fois, me direz-vous ! La diode Zener nous réserve une surprise : elle claque sans pour autant être détruite ! Ainsi, on peut continuer à l'utiliser.



Attention cependant, la tension inverse n'a quasiment pas de limite si ce n'est que la puissance qui traverse la diode ne doit pas être supérieure à celle supportée par la diode.

### Symbole

Il n'existe pas de norme américaine ou européenne pour la diode Zener. Elle a plusieurs symboles :



Figure 11 : symboles de la diode Zener



Pour les futurs schémas qui suivent, j'utiliserais le troisième symbole, le plus couramment utilisé.

## Fonctionnement

### Polarisation directe

Regardons ensemble le fonctionnement de la diode Zener en polarisation directe. Pour cela, observez le schéma suivant :

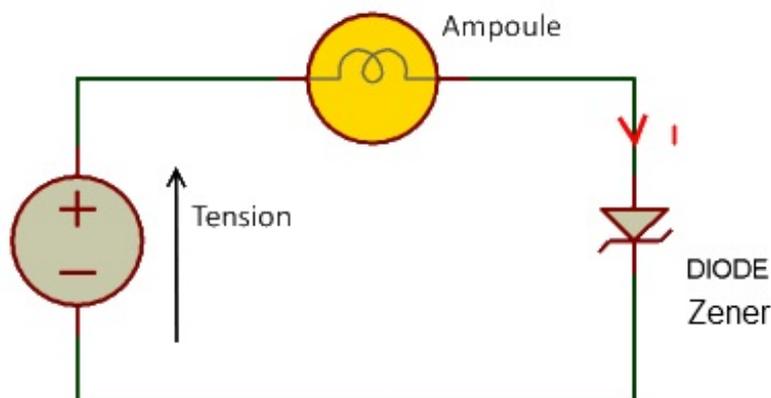


Figure 12 : polarisation directe d'une diode Zener -

On suppose que la tension du générateur est suffisamment grande pour éclairer l'ampoule et dépasser le seuil de la diode

Ce schéma ne vous rappelle-t-il pas quelque chose ? Si bien sûr ! C'est celui que je vous ai présenté lorsque je vous ai montré le fonctionnement d'une diode standard !



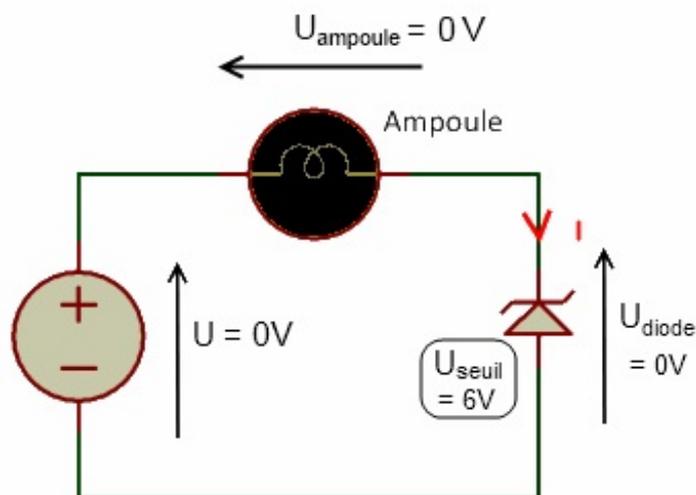
Au final, en polarisation directe, ce n'est rien d'autre qu'une diode normale ? 🤔

C'est exact et c'est pourquoi on ne s'attardera pas là dessus.

### Polarisation inverse

En fait, l'intérêt principal de la diode Zener est de la brancher dans le sens opposé. Dès que la tension inverse à ses bornes est plus élevée que sa tension de claquage, la diode devient passante et le potentiel à ses bornes prend alors la valeur de sa tension de claquage.

Voilà une suite du même montage, à des valeurs de tension différentes, qui vous permettra de mieux comprendre son fonctionnement :



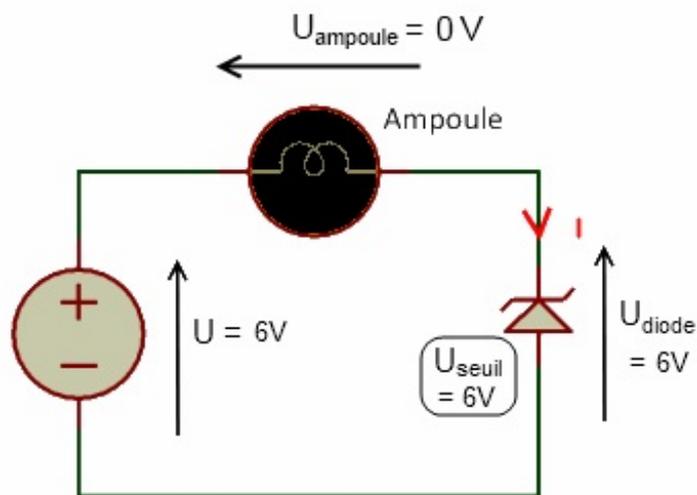


Figure 13a : polarisation inverse de la diode Zener - tension inverse inférieure à la tension Zener

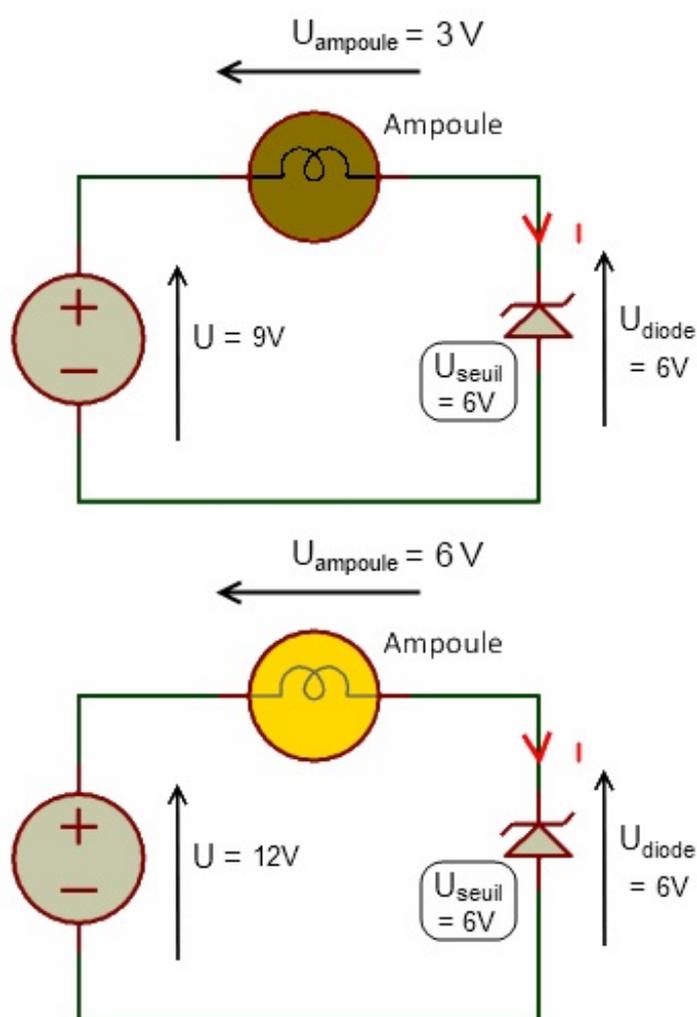


Figure 13b : polarisation inverse de la diode Zener - tension inverse supérieure à la tension Zener, l'ampoule s'éclaire

A savoir :

- la diode Zener que j'ai utilisée à une tension de seuil inverse de 6V
- l'ampoule est correctement allumée lorsqu'elle est alimentée sous 6V

### Observations

La diode Zener ne devient passante que lorsque la tension appliquée à ses bornes dépasse sa tension de seuil. Sachez d'ailleurs que la tension de seuil inverse d'une diode Zener est tout simplement appelée **tension Zener**.

Une fois que l'on a dépassé la tension Zener de la diode, le fait d'augmenter la tension fournie par le générateur ne change en rien la tension aux bornes de la diode. Dans notre exemple, la tension aux bornes de la diode reste approximativement égale (on verra pourquoi) à sa tension Zener.



Par cette caractéristique, on nomme souvent la diode Zener comme : **diode de régulation**. C'est-à-dire qu'elle **régule la tension**. On aura l'occasion d'en reparler plus loin.

### Courbe caractéristique

Afin d'avoir une approche plus rigoureuse que ce schéma animé, je vous propose de regarder la courbe caractéristique des tensions pour la diode Zener. Vous verrez qu'elle est similaire à celle d'une diode standard :

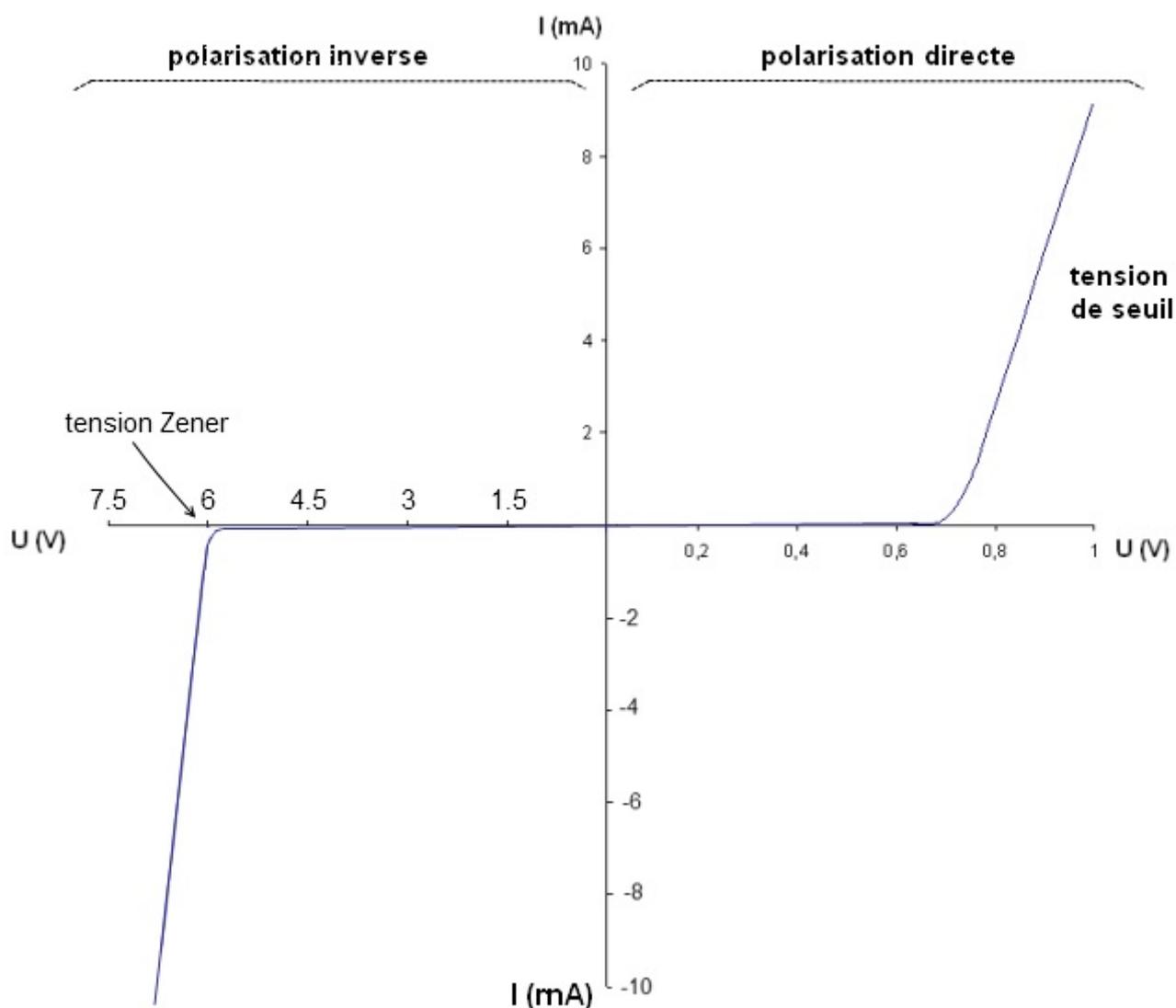


Figure 14 : Courbe caractéristique d'une diode Zener en fonction des tensions

Je vous disais que la tension aux bornes de la diode Zener est approximativement égale à sa tension Zener nominale. C'est à dire, pour notre diode à tension Zener de 6V, eh bien la tension à ses bornes sera de 6V (lorsque la tension qui lui est appliquée est supérieure ou égale à sa tension Zener), mais plus la tension à ses bornes augmentera, plus la tension Zener va "varier". En fait, cette tension Zener n'est pas stable face au courant traversant la diode. Elle va donc légèrement augmenter avec le courant.

Parfois cela peut-être gênant, on préférera utiliser d'autres dispositifs plus performants. S'il s'agit de réguler une tension, par exemple, on utilisera plutôt un *régulateur intégré*.

## Équivalence

Le dernier point à voir avec la diode Zener est son équivalence avec un composant. Vous l'aurez peut-être deviné, bien que ce ne soit pas évident, la **diode Zener est équivalente à un générateur de tension**. Plus précisément, elle agit comme un générateur de tension en limitant la tension qui lui est appliquée.

### Tension appliquée aux bornes de la diode inférieure à la tension Zener

Lorsque la tension Zener est plus grande que la tension appliquée aux bornes de la diode, la tension aux bornes de la diode est égale à la tension fournie par le générateur.

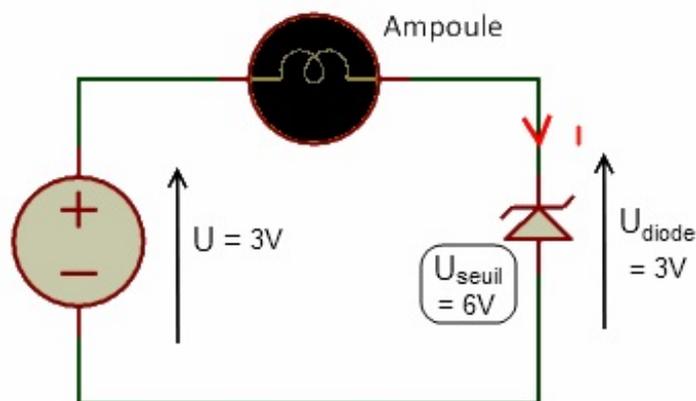


Figure 15 : tension Zener supérieure à la tension du générateur

On peut donc remplacer la diode par un interrupteur ouvert, car c'est comme si elle n'était pas connectée au montage :

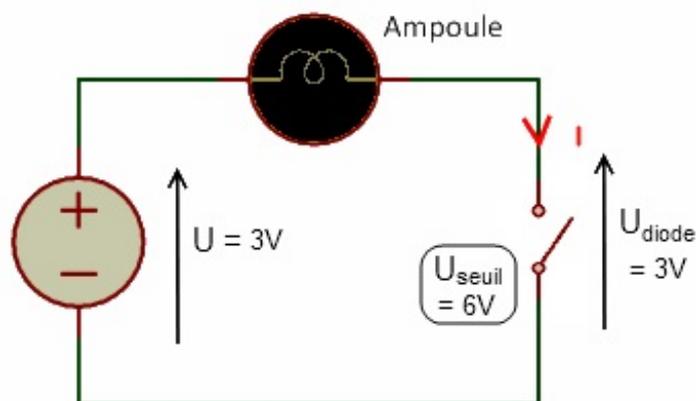


Figure 16 : la diode Zener est équivalente à un interrupteur ouvert lorsque sa tension Zener est supérieure à la tension à ses bornes

Jusque-là, rien de bien sorcier.

### Tension appliquée aux bornes de la diode supérieure à la tension Zener

A présent, la tension aux bornes du générateur est supérieure à la tension Zener de la diode :

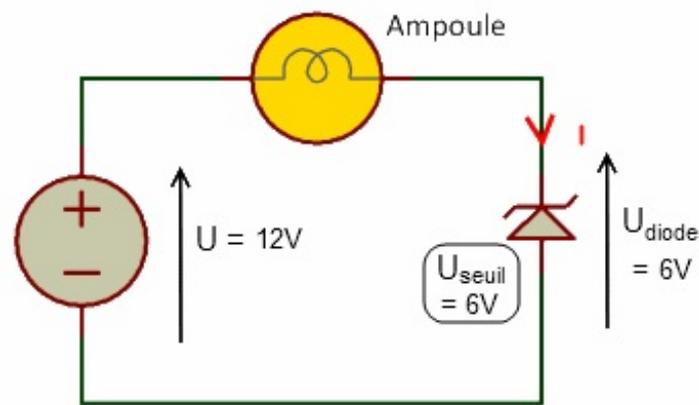


Figure 17 : tension Zener inférieure à celle du générateur

Quelle que soit la tension appliquée aux bornes de la diode, elle sera toujours égale à sa tension Zener ! On en conclut que cette diode peut alors être remplacée par un générateur de tension constante :

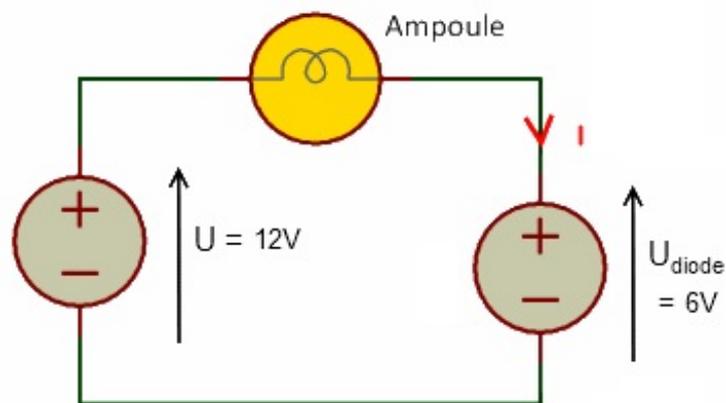


Figure 18 : diode Zener équivalente à un générateur de tension dès que la tension appliquée à ses bornes est supérieure à sa tension Zener



C'est une notion qui va nous permettre d'introduire certains théorèmes, alors je vous demande de le garder en mémoire pour le moment. On reviendra dessus lorsqu'on en aura besoin. 😊

## Diversité des diodes

### Cas d'utilisation de la diode

Si vous saviez ô combien la diode est utile et présente de partout ! Je vous donne une liste assez sommaire des applications possibles de la diode.

#### Redressement

On utilise souvent un pont de diode pour redresser la tension alternative fournie sur le secteur EDF : on oriente les tensions et courants positifs vers un point du circuit et faire de même pour les tensions et courants négatifs.

Pour cela il est courant d'utiliser un pont de diode, dont voici le schéma :

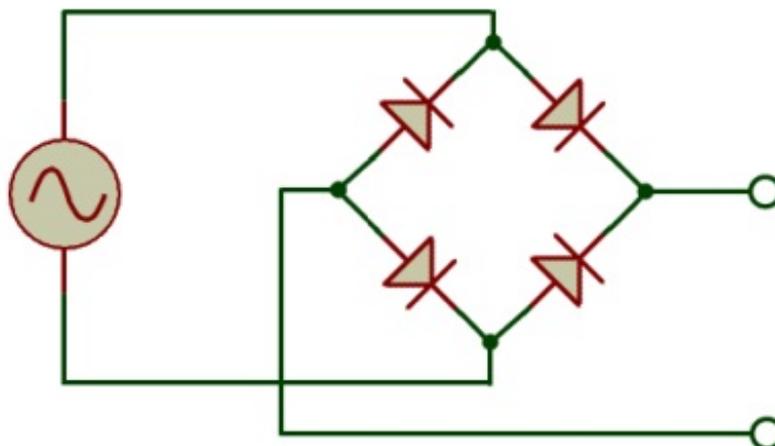


Figure 1 : schéma d'un pont de diode

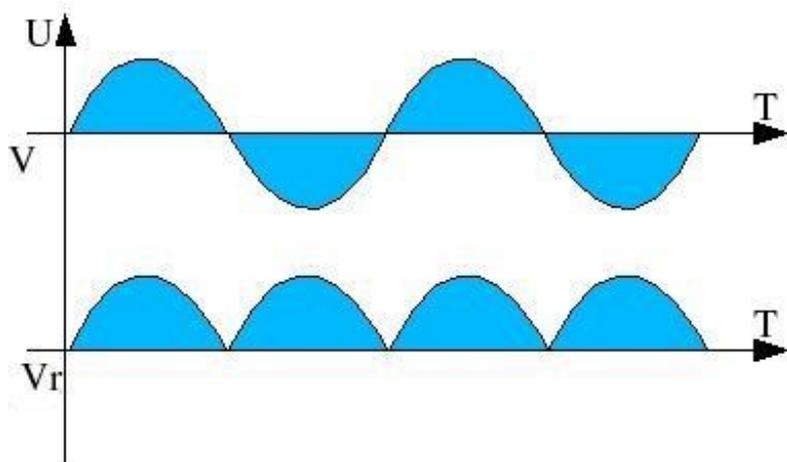


Figure 2 : tension en entrée du pont de diode (en haut), tension en sortie du pont de diode (en bas) - source Wikipédia



Ce pont n'est à utiliser qu'après avoir diminué la tension du secteur par l'intermédiaire d'un transformateur. Sans quoi cela pourrait faire de jolies étincelles ! 🤖

Nous aurons l'occasion d'en reparler, il ne s'agit là que d'une brève présentation.

### Protection

On peut employer une diode pour protéger des montages. On rencontre alors deux types de protection différents :

- Dans un cas, son rôle est de protéger un circuit qui grillerait si on inversait sa polarité. Pour exemple, il suffirait de brancher les piles à l'envers (dans n'importe quel appareil électronique) pour que celui-ci grille / brûle / fume / explose ! 🤖
- Dans un autre cas, elle permet de protéger les portes logiques dont les sorties ont été reliées entre elles.

### Détection ou démodulation

Pour recevoir la radio à modulation AM, il y a besoin de supprimer les alternances négatives du signal reçu. Pour ce faire, on met une diode en sortie de l'antenne de réception (bien sûr tout se passe dans le poste radio 🤖).

### *Circuit préférentiel*

C'est notre exemple que l'on a étudié tout le long de ce chapitre : la diode oriente le courant dans un circuit spécifique qui en commande un autre, mais pas l'inverse.

### Autres diodes

Des diodes, il en existe de tous types ! On en recense vraiment beaucoup dont les propriétés sont toutes aussi intéressantes les unes que les autres. Voici une liste assez sommaire des diodes les plus courantes :

- **Diode Très Haute Tension (THT)** : c'est une diode dont le fonctionnement est identique à celui des diodes standards, sauf qu'elle peut fonctionner sur des tensions dépassant largement le kilo-Volt ( $\gg 1000V$ ). Bien entendu, avoir une telle propriété n'est pas sans défaut, sa tension de seuil est elle aussi largement plus élevée qu'une diode standard au silicium.
- **Diode en réseau** : là, c'est simplement plusieurs diodes intégrées dans un seul boîtier, elles constituent un réseau car elles sont reliées par leurs anodes ou leurs cathodes. Leur fonctionnement est identique aux diodes standards
- **Diode varicap** : Cette diode est plus particulière que les autres. On la branche "à l'envers" et elle se comporte alors comme un condensateur de très très faible valeur, dont la capacité est variable selon la tension inverse appliquée à ses bornes.
- **LED** : Vous connaissez sûrement, cette diode est rigoureusement identique (niveau fonctionnement) à une "diode normale", mais elle a la capacité de s'éclairer. De nos jours, il s'agit de la diode la plus employée dans notre quotidien : on en trouve de partout !
- **Photodiode** : voilà le cas d'une autre diode très particulière, elle réagit aux ondes électromagnétiques qui la frappent. Chaque photodiode possède une sensibilité particulière : aux rayonnements du spectre visible de la lumière, aux infra-rouges, aux ultra-violets, ou encore à d'autres gammes de rayonnements. On se sert énormément des modèles sensibles aux infra-rouges pour les communications sans fil (pour les télécommandes notamment). On les utilise uniquement connectée en inverse pour servir de récepteur.
- **Diode Schottky** : elle fonctionne comme les diodes à jonction semi-conducteurs mais sont fabriquées à base d'une jonction métal - semi-conducteur. Leur vitesse de commutation est très élevée et leur tension de seuil plus faible que les diodes à jonction semi-conducteur. Elle est donc très utilisée pour les circuits de régulation de puissance.

Il existe encore plein de diodes, mais je ne les connais pas toutes et puis leur intérêt dans ce cours reste très limité. Maintenant que vous êtes initiés aux semi-conducteurs, vous allez pouvoir continuer avec ces types de composants en abordant le transistor...

## Le transistor en régime de saturation

Le transistor est sans aucun doute le composant qui a révolutionné l'histoire de l'électronique. Ce n'est pas par hasard que ses inventeurs (les américains John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain, chercheurs de la compagnie Bell Téléphone) ont reçu le prix Nobel de Physique en 1956. Grâce au transistor, la technologie a considérablement évolué et ce, dans de très nombreux domaines très différents. Si bien que l'on en trouve de partout ! 😊

Aujourd'hui, il existe toute une panoplie de transistors dont le comportement est plus ou moins complexe. Dans ce chapitre, nous débiterons par un transistor qui est relativement simple à comprendre. C'est par celui-là que tout électronicien qui se vaut commence son apprentissage. 😊



Le bipolaire n'est pas le plus utilisé. Le MOS, que nous verrons plus tard, compose quasiment tous les circuits logiques. En nombre, le MOS est bien plus présent. Le bipolaire reste plus utilisé en électronique de puissance en revanche.

### Présentation

Suite au chapitre sur les semi-conducteurs, nous allons voir ce qu'est un transistor et la "relation" qu'il a avec les diodes. Puis nous verrons dans quel but il a été inventé et son fonctionnement. Enfin, nous nous pencherons vers ses utilisations plus poussées.

### Le transistor

#### *Qu'est-ce qu'un transistor ?*

Avant tout, voilà la photo d'un transistor :



Cette photo est celle d'un transistor quelconque. Comme vous pouvez le constater, c'est un composant électronique, certes, mais, et c'est le seul que l'on a vu jusqu'à présent, il possède 3 pattes ! Pourquoi trois ? Nous répondrons à cette question dès que nous verrons son fonctionnement.

Il faut savoir que le transistor est un composant actif, le premier que l'on découvre ! 😊 Il n'est pas symétrique et est linéaire, mais seulement sur une plage de fonctionnement. Nous verrons que cette caractéristique linéaire est altérée en fonction de certains facteurs.

#### *Les rôles du transistor*

Tout au long de ce cours, nous avons eu à faire face à certains problèmes lorsqu'il était question de réaliser un montage, aussi simple soit-il : comment le réaliser, quelles solutions entreprendre, comment l'améliorer.

Retenons plusieurs problèmes évoqués :

- Lors de notre découverte du résistor, nous avons vu comment diviser une tension (pont diviseur de tension). Cependant, l'utilisation de ce montage n'est guère envisageable lorsqu'il s'agit d'alimenter un montage ayant un fort besoin en courant. D'autant plus que la tension en sortie du pont diviseur chute quand le courant augmente. Nous allons voir comment faire avec un transistor pour améliorer ce montage.
- Dans un autre cas : comment adapter la tension provenant d'un autre circuit que celui utilisé ? Par exemple, un capteur, qui délivre une tension inférieure au Volt, est connecté à un montage qui est commandé en 5V. Sans faire quelque chose pour que cela fonctionne, ce n'est pas possible. Néanmoins si on adapte la tension de sortie du capteur, vers une tension plus appropriée pour le montage, alors cela devient réalisable et ce, avec un transistor pour amplifier le signal délivré par le capteur.

D'une façon plus générale, le transistor peut faire les choses suivantes : amplifier une grandeur électrique (tension, courant, puissance) ; commander une grandeur électrique ou un signal.

### *Diversité des transistors*

Eh oui ! Le titre implique qu'il existe plusieurs types différents de transistors. Rassurez-vous, on ne va pas tous les étudier. Ce serait trop long et fastidieux, sachant que même un livre regroupant un minimum de 1000 pages, ne suffirait pas à détailler complètement le fonctionnement des transistors d'un seul type ! 💡

Tiens, parlons-en des types !

Chez les transistors, de manière générale, on distingue deux caractéristiques : leur **type** et leur **technologie**.



Qu'est-ce que c'est exactement ?

- Le **type**: c'est la famille auquel appartient le transistor. Il existe 4 grandes familles, qui sont : les transistors *bipolaires*, les transistors à *effet de champ*, les transistors *uni-jonction* et les transistors *hybrides* (qui allient en eux deux types de transistors).
- La **technologie**: pour chaque famille de transistor, il existe une ou plusieurs technologies différentes. On retrouve les technologies *NPN* et *PNP* pour les transistors bipolaires ; les technologies *CMOS* et *FET* pour les transistors à effet de champ ; en fin, la technologie *IGBT* chez les transistors hybrides

Voilà donc un aperçu de ce qui vous attend pour la suite. 🐱



Pour les deux chapitres qui suivent (celui-ci inclus), nous nous concentrerons sur les transistors bipolaires. A fin de faciliter votre apprentissage, je ne parlerais pas du transistor PNP avant la fin de ce chapitre.

## Le transistor bipolaire

Avant de nous lancer tête baissée dans l'apprentissage du fonctionnement du transistor bipolaire, je vous propose d'abord de voir quelle relation il entretient avec les diodes.

### *Technologie NPN*

Le titre est assez parlant je trouve, pas vous ?

Le transistor à technologie bipolaire est fabriqué à partir des mêmes propriétés physiques du semi-conducteur utilisé pour les diodes. On retrouve donc notre jonction PN, à laquelle on adjoint un nouveau pôle de type P pour les transistors PNP ; de type N pour les transistors NPN.

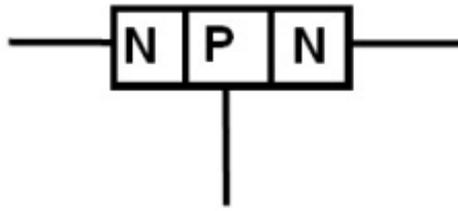


Figure 1 : technologie NPN d'un transistor bipolaire

Voilà donc la relation qu'il a avec les diodes, et plus généralement, les semi-conducteurs.



Je vous disais précédemment qu'un transistor est comme deux diodes dont leur jonction de même type sont accolées. Attention car sur le fonctionnement du transistor, il ne se passe pas exactement la même chose. Retenez donc que **le transistor ne fonctionne pas comme deux diodes côte à côte.**

### Symbole

Étant donné que le transistor possède trois pattes, il en va de même pour son symbole :

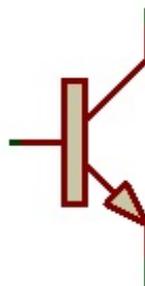


Figure 2 : symbole du transistor NPN

### Fonction des bornes

Afin de repérer clairement les bornes du transistor, ses inventeurs ont donné un nom bien particulier pour chacune de ces pattes :

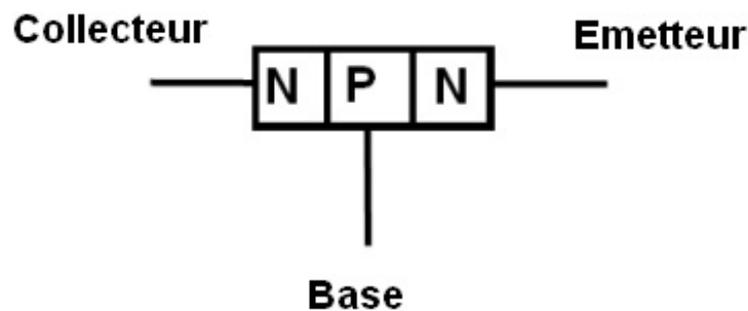
**Le collecteur:** C'est par le collecteur que les courants vont entrer dans le transistor. Cependant, et ce n'est pas rare, on peut récupérer le signal de sortie sur le collecteur. Nous verrons cela plus loin.

**La base:** La base joue un rôle déterminant pour le transistor. Car c'est elle qui commande le passage du courant à travers le transistor.

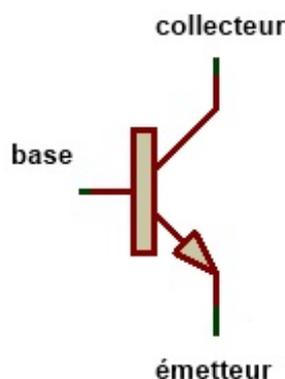
**L'émetteur:** Les courants de base et de collecteur qui entrent dans le transistor ont besoin de sortir de celui-ci, sinon il y a problème ! L'émetteur a été inventé pour ça. C'est donc par lui que sortent les courants provenant de la base et du collecteur. On récupère là aussi le signal de sortie.

### Emplacement des bornes

Sur ce schéma j'ai rassemblé le nom des broches correspondantes avec le type de jonction :



Et pour le symbole :



Quelques remarques :

- Le collecteur est toujours connecté avec une jonction N, dans un transistor NPN
- Il en va de même pour l'émetteur
- La base, quant à elle, est connectée à la jonction P du transistor NPN

### Les différents fonctionnements

Pour corser un peu les choses, il existe plusieurs façons d'utiliser un transistor ! Ou plus exactement, le transistor peut fonctionner dans deux régimes différents :

- **Régime de saturation** : dans ce régime, le transistor peut avoir deux états : un état "bloqué" ou un état "passant" (ou "saturé"). On parle de saturation lorsque le transistor est à l'état passant, c'est à dire lorsque le courant traverse le transistor du collecteur vers l'émetteur. Inversement, il est dit bloqué lorsque le courant ne le traverse plus.
- **Régime linéaire** : différent du régime de saturation, le régime linéaire nous donne la possibilité d'avoir une infinité d'états du transistor. Le passage du courant entre le collecteur et l'émetteur peut donc prendre les valeurs suivantes : un tout petit peu passant, un peu plus passant, un peu passant, moyennement passant, passant, un peu plus passant, passant beaucoup, passant très beaucoup, ... Vous l'aurez compris, il y en a beaucoup ! 😊

Dans un premier temps, nous nous concentrerons sur le régime de saturation qui est le plus facile à assimiler. Le régime linéaire sera abordé ensuite.

### Régime de saturation

Ce régime est assez simple à comprendre, c'est pourquoi c'est par celui-là que nous commençons. 😊

## Fonctionnement en régime de saturation

Pour comprendre le fonctionnement du transistor dans ce fameux régime, il suffit de deux schémas avec le même montage mais un état différent de l'interrupteur : ouvert et fermé.

C'est un montage simple constitué de trois composants et d'une source d'alimentation ; l'interrupteur est pour l'instant ouvert :

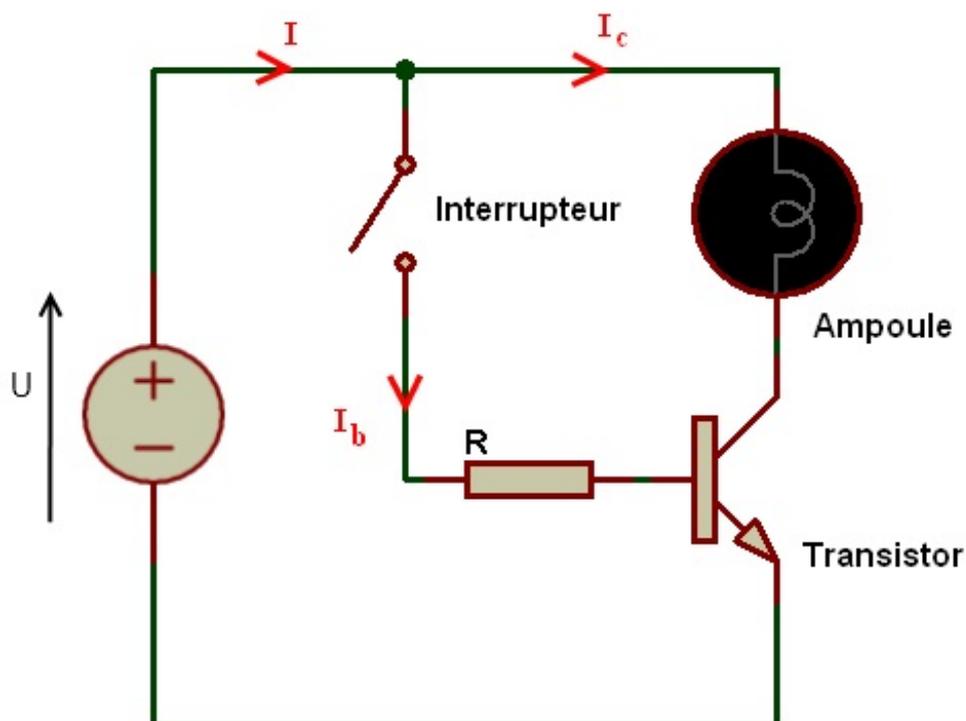


Figure 3 : La base du transistor n'est pas alimentée, l'ampoule ne s'allume pas

Lorsque l'on ferme l'interrupteur :

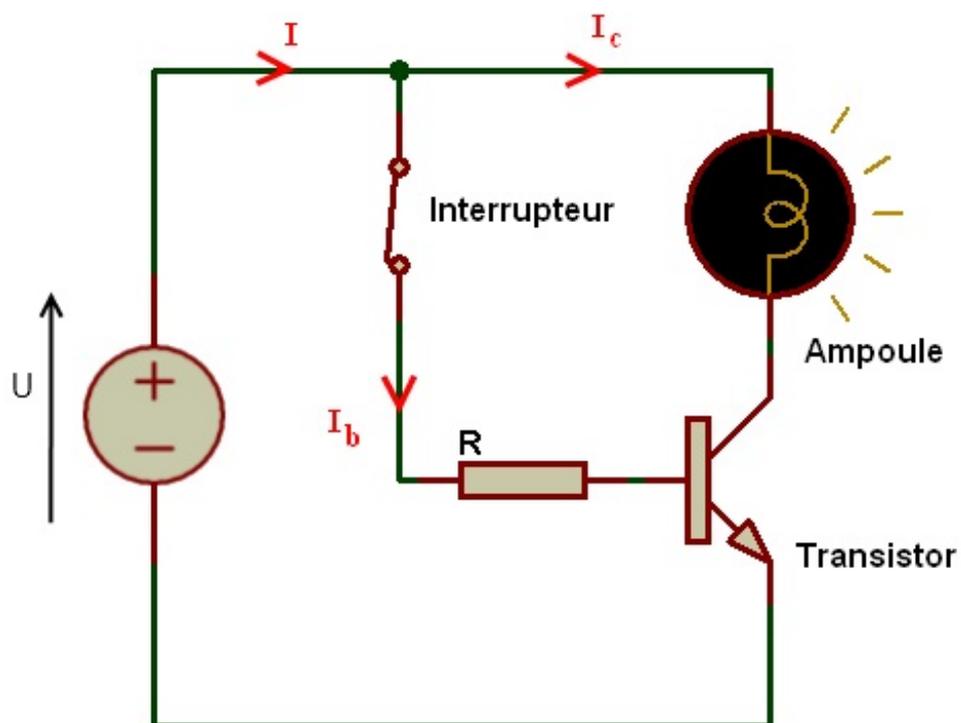


Figure 4 : La base est alimentée, le transistor allume l'ampoule



Ce montage fonctionne dans la réalité, mais pourquoi ?

### Les états du transistor

Cette expérience montre que le transistor peut prendre deux états : ou il laisse passer le courant dans l'ampoule, ou il ne le laisse pas passer. On parle alors, dans ce régime uniquement, des états du transistor.

- Un état **bloqué**: dans cet état, le transistor ne conduit pas : le passage du courant entre son collecteur et son émetteur est impossible. Il bloque le courant, d'où son nom.
- Un état **saturé** ou **passant**: le transistor est en état de conduction. Le courant passe entre le collecteur et l'émetteur du transistor.

### Fonctionnement

Plus haut, j'ai présenté les bornes du transistor. Je vous ai dit que la base du transistor jouait un grand rôle dans son fonctionnement. En effet, le transistor n'aurait aucun intérêt sans sa base.

Nous pouvons retenir ceci de l'analyse du montage :

- Lorsque l'interrupteur est ouvert (c'est-à-dire qu'il coupe le circuit), il n'y a pas de courant sur la base du transistor. Et lorsqu'il n'y a pas de courant qui arrive sur la base du transistor, il n'y a pas de courant qui circule entre le collecteur et l'émetteur du transistor.
- A l'inverse, dès que l'on ferme l'interrupteur, le courant peut circuler dans la base du transistor ce qui a pour effet de rendre possible le passage du courant entre le collecteur et l'émetteur du transistor.

Cela nous amène à dire la chose suivante: **l'intensité du courant qui arrive sur la base du transistor influence l'intensité du courant qui traverse le transistor.**

### Courant de base



Ha ! Ha ! Oui, mais comment ? 🤖

Lorsqu'il y a un courant inexistant ou très faible sur la base du transistor, celui-ci ne conduit pas et est donc à l'état bloqué. En revanche, lorsque le courant est suffisant (mais pas trop fort, sinon le transistor grille 😬) il conduit et est donc à l'état saturé. Par conséquent, l'ampoule de notre montage peut s'éclairer en toute harmonie. 😊

Le courant de base doit être positif (pour que le transistor conduise) ou nul (pour qu'il se bloque).

$$0 < I_b$$

Un courant nul correspond à l'état bloqué du transistor.



Et où va le courant de base ?

Excellente question ! Le courant de base est en fait additionné au courant collecteur. Cette union nous amène à un résultat qui n'est autre que  $I_E$ . D'où la formule :

$$I_E = I_B + I_C$$

Mais bien souvent, le courant de base est insignifiant par rapport au courant collecteur. On simplifie donc la formule précédente

comme ceci :

$$I_E \approx I_C$$



Cette dernière formule n'est vraie que si :  $I_B \ll I_C$  (comprenez très inférieur).

### Protection du transistor

S'il y a bien un point à ne négliger en aucun cas, c'est bien celui-ci : protéger un transistor. Vous le remarquez, j'ai mis des résistances sur la base et le collecteur du transistor. Et bien ce sont ces résistances qui vont protéger le transistor contre les courants trop élevés.

En effet, le transistor peut supporter un courant maximal qu'il ne faut pas dépasser. De son collecteur vers son émetteur, le courant maximum peut être de l'ordre du milliampère pour certains transistors allant jusqu'à la dizaine d'ampères pour d'autres. En revanche, pour la base, le courant est de l'ordre du microampère jusqu'à environ la dizaine de milliampères. Chaque transistor possède ses propres caractéristiques qui sont données dans le document constructeur\* associé.



Il faut se souvenir que les **transistors sont des composants hyper fragiles !** La moindre erreur de manipulation ou de branchement peu anéantir notre transistor. C'est pourquoi il est recommandé de vérifier la bonne polarisation des transistors sur un montage avant de le mettre sous tension !

### Utilité du montage



Il est vrai que vu comme ça, le montage ne sert à rien, non ? 🤔

Oui, de cette sorte, le présent montage est "inutile" car il suffirait de simplement mettre l'interrupteur en série avec l'ampoule pour obtenir un résultat identique.

Mais prenons un exemple avec ce montage :

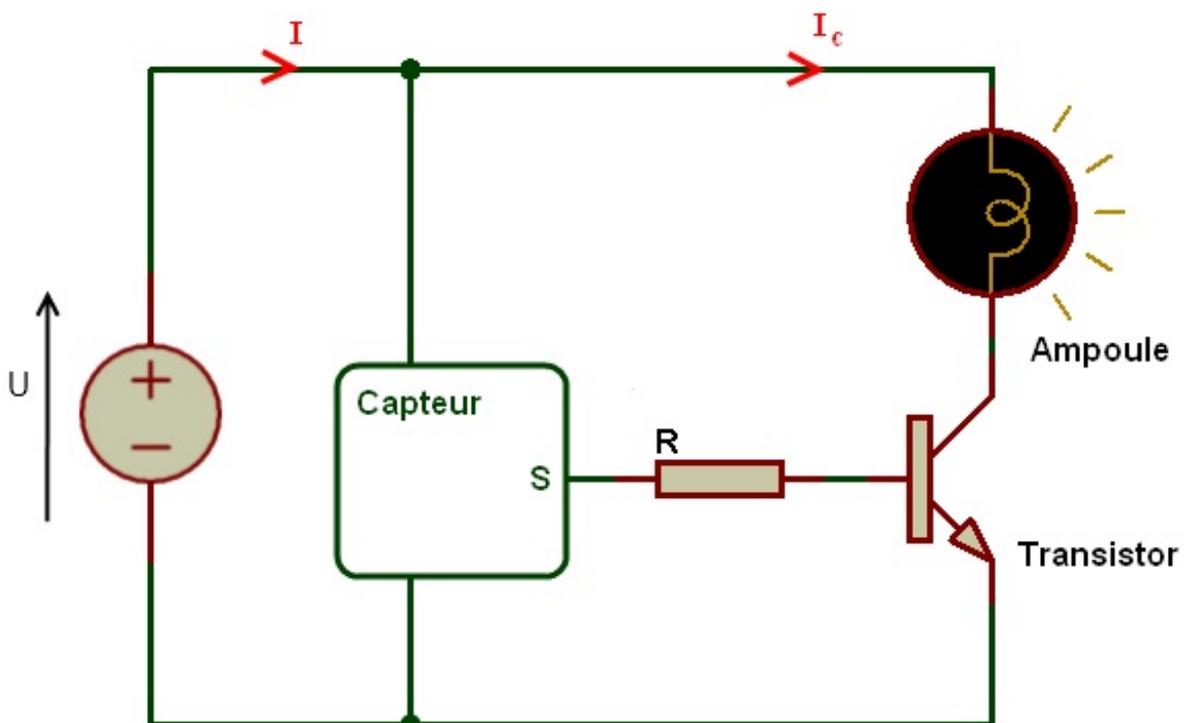


Figure 5 : commande de puissance avec un transistor

Imaginons que, dans ce montage, le capteur génère en sortie une tension de 10V lorsqu'il reçoit une grandeur physique spécifique, et une tension nulle lorsqu'il ne capte rien. Cette tension de sortie va commander la base du transistor. Ce même transistor, qui fonctionne en régime de saturation, va commander à son tour une ampoule. Par conséquent, quand le montage sera sous tension, à l'instant où le capteur se déclenchera, le transistor passera à l'état passant et l'ampoule s'allumera.

C'est donc là toute la subtilité du montage ! 😬 De cette manière, on peut fabriquer un capteur qui détecte la présence ou non d'une personne dans une pièce en déclenchant la lumière.



Je reste sceptique tout de même, pourquoi ne met on pas l'ampoule directement en sortie du capteur ?

En général, les capteurs, au sens brut, n'ont pas pour mission d'alimenter directement le circuit que l'on veut commander. Certains capteurs même, ne fournissent aucune tension en sortie ! Par exemple les capteurs dont la résistance varie avec la température ou l'humidité. Après, bien évidemment, pour exploiter ces derniers, il faudra leur joindre une tension. Cela dit, ils ne pourront pas non plus commander directement un montage. Il faut dans tous les cas adapter la grandeur physique délivrée par un capteur !

Reprenons le précédent montage. Si je lui enlève le transistor et que je branche directement l'ampoule :

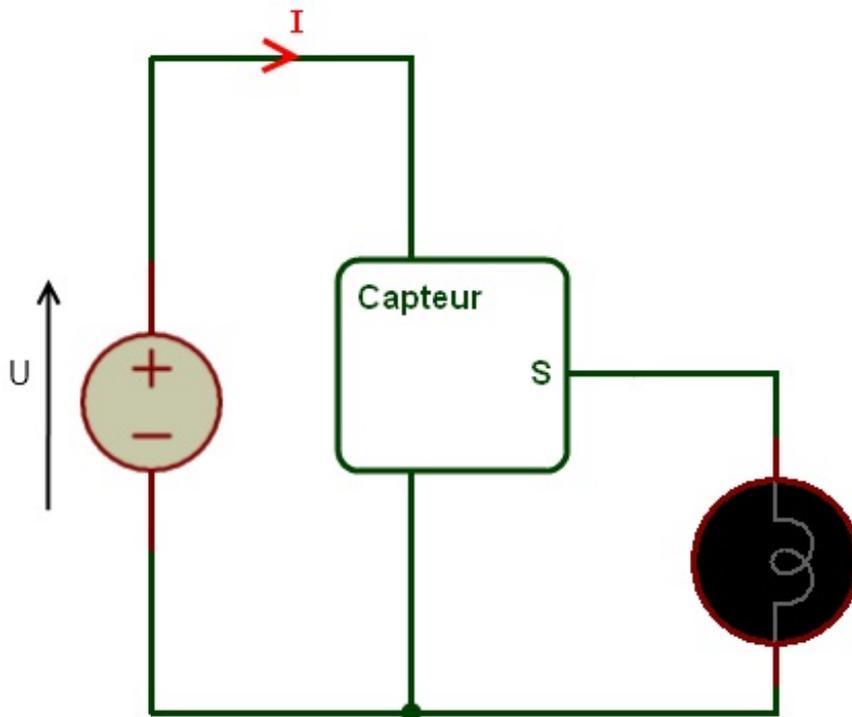


Figure 6 : alimentation de l'ampoule en sortie du capteur - la puissance nécessaire à l'ampoule pour s'allumer n'est pas suffisante en sortie du capteur

Le capteur ne va pas fournir assez de puissance pour qu'elle s'éclaire. D'autres capteurs vont peut-être pouvoir fournir assez de courant pour une seule ampoule, mais si je mets une centaine d'ampoules, le courant sera insuffisant et aucune des ampoules ne s'éclairera !



Je l'ai dit est le répète, un capteur n'est pas fait pour alimenter un montage mais pour donner l'état d'une grandeur physique (température, humidité, ...) !

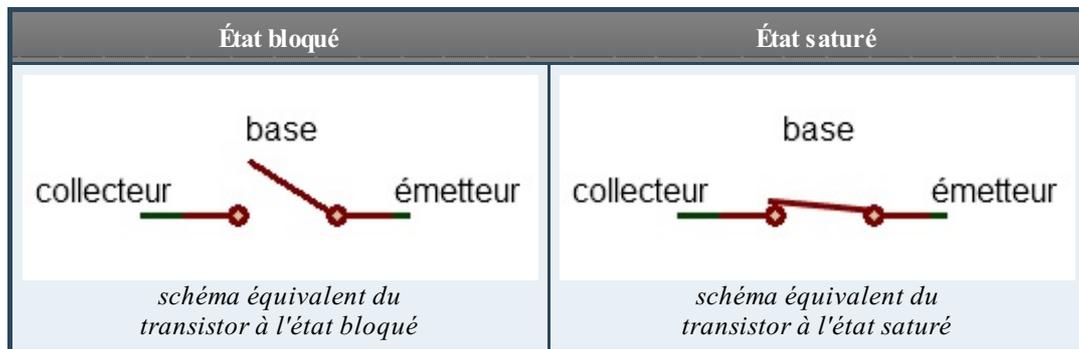
Dès lors que nous utiliserons un transistor, ce dernier va **amplifier** le courant du capteur pour en fournir assez pour les 100 ampoules à alimenter !

Nous entrons, par cette propriété, dans le régime linéaire...

## Conclusion

Brève conclusion pour voir ce que l'on a appris jusqu'à présent.

Le transistor, en régime de saturation, se comporte comme un interrupteur commandé par un courant sur sa base. Il peut donc traiter des signaux électriques pour exécuter les ordres suivants : devenir passant ou bloqué.



Dans un montage électrique, il peut être intéressant d'utiliser un transistor afin de rendre "intelligent" ce montage, dans le sens où le montage va pouvoir réagir à un événement donné. C'est pour cette capacité de travail logique que l'on emploie les transistors dans les processeurs de nos ordinateurs, ainsi que dans beaucoup d'autres objets électroniques.

Finalement, on retiendra que le transistor est commandé par son entrée et commande sa sortie. On peut donc le diviser en deux parties : une *partie commande* et une *partie puissance* (sans oublier l'alimentation 😊).

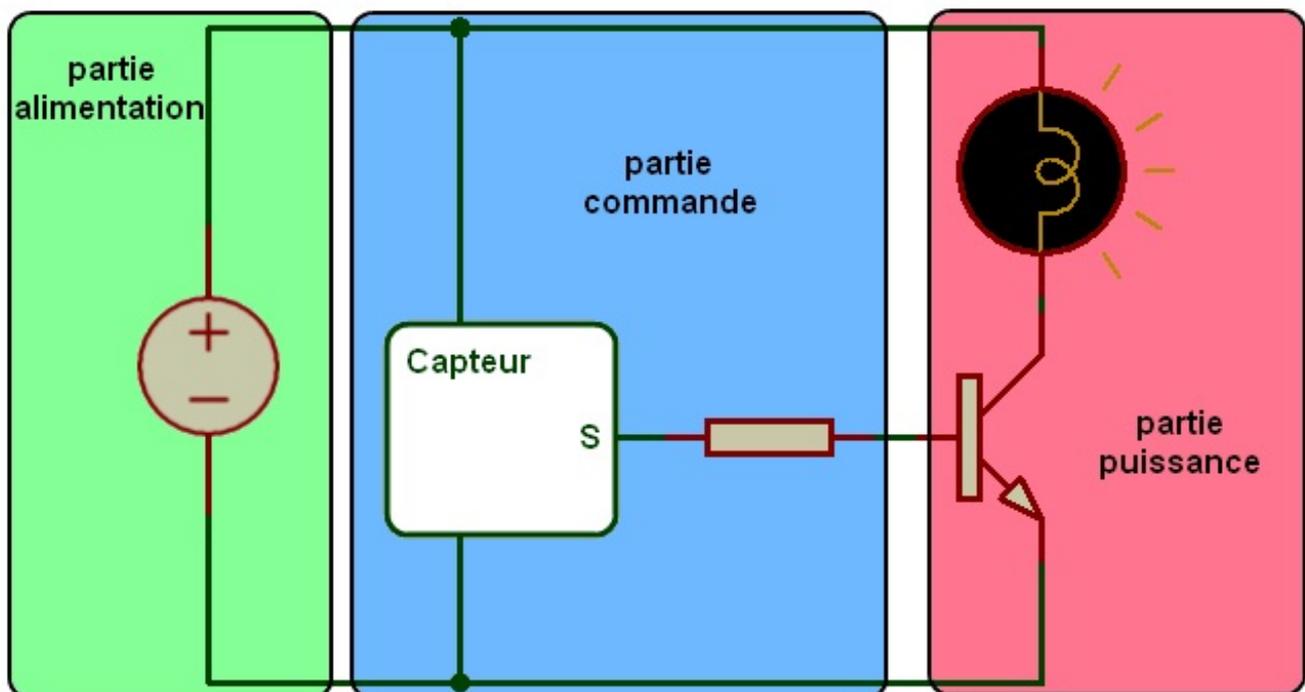


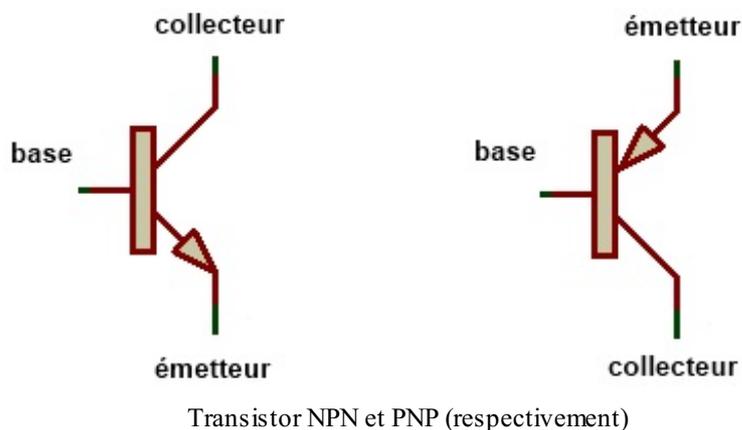
Figure 7 : utilisation générale des transistors

## Le transistor PNP

Nous finissons ce chapitre par les transistors PNP. Rassurez-vous, il est plus facile de comprendre leur fonctionnement maintenant que vous savez utiliser les transistors NPN.

### Différences NPN / PNP

Rappelez-vous de la structure interne d'un transistor NPN. Il y a dedans une parcelle de silicium dopée en deux endroits pour réaliser les jonctions P et N. Et bien dans le transistor PNP il y a exactement la même chose, à l'inverse qu'il y a deux jonctions P et une jonction N.



### Utilité

Dans certains montages, un transistor PNP peut résoudre bien des problèmes et simplifier les schémas.

### Fonctionnement

Le fonctionnement est rigoureusement identique que celui des NPN, sauf que le courant de base doit être différent. En effet, la base est reliée à une jonction de type N, contrairement aux NPN où la base est reliée à une jonction de type P. Voyons comment on polarise un PNP avec le schéma suivant :

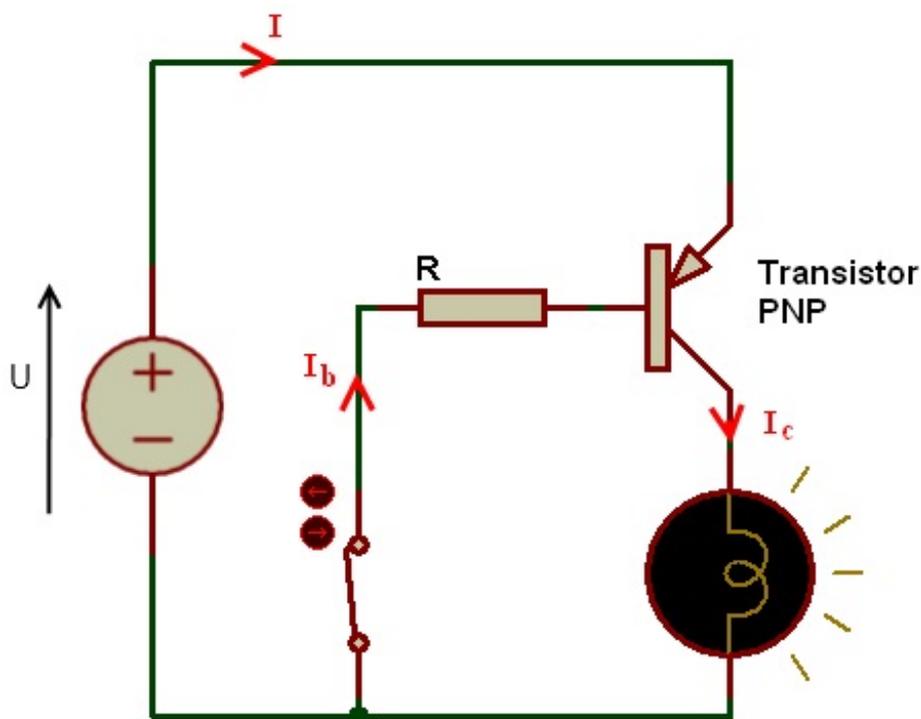


Figure 8 : utilisation du transistor PNP

Lorsque l'interrupteur est ouvert, il n'y a pas de courant sur la base du transistor, qui par conséquent ne conduit pas.

Dès que l'on ferme l'interrupteur, le courant peut alors passer (atténué par la résistance de protection), ce qui permet au transistor d'être passant.

### Courant de base

Le courant doit être nul (le transistor se bloque) ou négatif pour que celui-ci fonctionne convenablement. Tout comme les NPN,

le courant de base ne doit pas être supérieur à une certaine intensité, ce qui aurait pour effet de le faire griller.

$$I_b < 0$$

Un courant nul correspond à un transistor bloqué.

### *Protection*

Il en est de même que pour les NPN, le transistor doit être protégé par des résistances sur sa base et son collecteur, sous peine de le voir griller !

Bien que ce chapitre soit facile, vous ne savez guère utiliser le transistor plus loin qu'un interrupteur. C'est pourquoi j'ai décidé de vous expliquer dans le prochain chapitre le fonctionnement du transistor bipolaire en régime linéaire.

Waouuu ! Que je suis généreux 🤔 😊

J'espère que ce cours vous a plu et qu'il vous sera bénéfique, car il n'est pas terminé et d'autres parties verront le jour. Sachez que si vous avez la moindre question ou le moindre doute sur quelque chose, n'hésitez pas à en parler sur le forum dédié.

Je vous invite également à poster des commentaires pour laisser une trace de votre opinion sur le tutoriel (j'attends des commentaires constructifs, qu'ils soient positifs ou négatifs).

En tout cas, je vous dis à bientôt et faites de beaux montages ! 😊

### *Remerciements :*

- A tous ceux qui soutiennent le projet
- A vous, amis zéro
- A [Spacefox](#) pour l'aide qu'il m'a apportée lors du refus de validation de la première version du cours
- A [Thunderseb](#) pour le reste
- A [mewtow](#) qui aura rédigé une partie du tuto, mais qui malheureusement nous quitte à cause d'un manque de temps
- A [tth7](#), idem que mewtow
- A [Astalaseven](#) qui est notre correcteur de fautes
- Et aux rédacteurs avec lesquels je travaille