



# Introduction

Ce document pose les bases de l'électronique.

Il couvre aussi certaines questions des *listes de questions d'examens en radio amateur*

Chaque section comprend des explications théoriques, des exercices et des laboratoires permettant de vérifier la compréhension des sujets.

# Introduction

## Matériels nécessaires

Pour les personnes désirant faire les laboratoires, certains items seront nécessaires.

J'utilise les numéros d'inventaire de la compagnie *DigiKey*<sup>1</sup> à titre indicatif seulement.

D'autres fournisseurs existent aussi mais sans accès aux fiches techniques de leurs produits.

---

<sup>1</sup><https://www.digikey.ca/>

# Introduction

Matériels nécessaires, Équipement de base

Tableau 1.1 – Équipement de base

Item	# DigiKey	Qté
Batterie 9 V	P687-ND	1
Snap 9 V	36-232-ND	1
Platine de montage « full »	1528-2143-ND	1
Cavaliers divers	1528-1967-ND	1

# Introduction

## Matériels nécessaires, Composants

Tableau 1.2 – Composants pour les laboratoires.

Item	# DigiKey	Qté
Résistances 10 $\Omega$	S10QCT-ND	10
Résistances 470 $\Omega$	S470QCT-ND	10
Résistances 1 k $\Omega$	S1KQCT-ND	10
Résistances 22 k $\Omega$	S22KQCT-ND	10
Potentiomètre 10 k $\Omega$	3310R-125-103L-ND	1
Potentiomètre 1 M $\Omega$	3310Y-001-105L-ND	1
Condensateur 4,7 $\mu$ F	P5177-ND	2
Condensateur 1 $\mu$ F	P5330-ND	2
Condensateur 0,01 $\mu$ F	EF2103-ND	2
Condensateur 0,05 $\mu$ F	BC5192-ND	1
Condensateur 220 $\mu$ F	P5183-ND	1
Haut-parleur 8 $\Omega$	668-1135-ND	1
Photocell	PDV-P8103-ND	1
DEL	1080-1067-ND	2

# Introduction

Matériels nécessaires, Outils

Tableau 1.3 – Outils facultatifs pour les laboratoires.

Item	# DigiKey	Qté
Multimètre V, A, $\Omega$	1188-DIGITAL-MULTIMETERR-V-I-T-ND	1
Lunette de sécurité	3M155887-ND	1

Nous allons maintenant (re)voir quelques notions de bases qui seront utilisées dans ce document.

# Notions générales

## Lettres grecques

Tableau 2.1 – Alphabet grec (partiel)

Majuscule	Minuscule	grec classique	grec moderne
$\Delta$		delta	delta
	$\lambda$	lambda	lambda
	$\nu$	nu	nu
	$\tau$	tau	tau
	$\epsilon$	epsilon	epsilon
	$\mu$	mu	mi
	$\nu$	nu	nu
	$\pi$	pi	pi
$\Sigma$		sigma	sigma
$\Omega$		oméga	omega

# Notions générales

## Symboles mathématiques

Pour apporter des précisions à des valeurs, on utilise parfois des symboles et des lettres.

En voici quelques uns :

- $\Delta$  : Une différence entre deux valeurs
- $\Sigma$  : Une somme de plusieurs valeurs
- $\approx$  : Une valeur approximative
- $\pm$  : Une plage de valeurs en plus ou en moins à une valeur médiane
- $\infty$  : Une valeur infinie

# Notions générales

## Constantes mathématiques

Tableau 2.2 – Constantes mathématiques utilisées dans ce document

Symbole	Description	Valeur
$\pi$	Rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre	$\approx 3,1417$
$c$	Vitesse de la lumière	299 792 458 m/s

Dans plusieurs domaines, des documents de références et conventions sont établies pour s'assurer de parler des même choses et d'éviter de « réinventer la roue ».

En anglais on parle de « standards » mais en français on fait une distinction avec deux mots :

- Norme : Référence établie par un organisme dédié à cette fonction et largement diffusée ;
- Standard : Référence technique ne provenant pas d'un organisme de normalisation mais ayant quand même une large diffusion.

# Notions générales

Normes et standards, Bureau international des poids et mesures

Le **Bureau international des poids et mesures (BIPM)** gère les normes des principales unités de mesures.

- Fondation : 1875
- Langues : anglais, français
- Accès : Gratuit
- Lien : <https://www.bipm.org/>

# Notions générales

Normes et standards, Commission électrotechnique internationale

La **Commission électrotechnique internationale (CEI)** gère des normes électriques et électroniques.

- Fondation : 1906
- Langues : anglais, français
- Accès : Payant
- Lien : <https://www.iec.ch/>

# Notions générales

Normes et standards, American National Standards Institute

Le **American National Standards Institute (ANSI)** gère diverses normes.

- Fondation : 1918
- Langues : anglais
- Accès : Payant
- Lien : <https://ansi.org/>

# Notions générales

Normes et standards, International Organization for Standardization

Le **International Organization for Standardization (ISO)** gère diverses normes.

- Fondation : 1947
- Langues : anglais, français, russe
- Accès : Payant
- Lien : <https://iso.org/>

Le **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** gère des normes électroniques.

- Fondation : 1963
- Langues : anglais
- Accès : Payant
- Lien : <https://www.ieee.org/>

# Notions générales

Normes et standards, Office québécois de la langue française

L'Office québécois de la langue française (OQLF) gère les normes linguistiques au Québec.

- Fondation : 1963
- Langues : français
- Accès : gratuit
- Lien : <https://www.oqlf.gouv.qc.ca/>

# Notions générales

## Le système international d'unités

Le **système international d'unités (SI)** est régi par le **BIPM** et consiste en :

- Un ensemble d'unités de base et dérivés ;
- Un ensemble de préfixes, en base décimale ;
- Une description pour l'écriture des nombres, unités et préfixes.

# Notions générales

Le système international d'unités, Les unités

Tableau 2.3 – Unités courantes du SI

Mesure	Unité	Symbole
Temps	seconde	s
Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Intensité électrique	ampère	A
Différence de potentiel électrique	volt	V
Résistance électrique	ohm	$\Omega$
Conductance électrique	siemens	S
Capacité électrique	farad	F
Inductance	henry	H
Puissance	watt	W
Fréquence	hertz	Hz

# Notions générales

Le système international d'unités, Les préfixes

Tableau 2.4 – Préfixes communs du SI

Facteur	Nom	Symbole	Nombre décimal
$10^{12}$	tera	T	1 000 000 000 000
$10^9$	giga	G	1 000 000 000
$10^6$	mega	M	1 000 000
$10^3$	kilo	k	1000
$10^0$			1
$10^{-3}$	milli	m	0,001
$10^{-6}$	micro	$\mu$	0,000 001
$10^{-9}$	nano	n	0,000 000 001
$10^{-12}$	pico	p	0,000 000 000 001

# Notions générales

Le système international d'unités, Écriture des nombres

- Si le nombre se situe entre  $+1$  et  $-1$ , le séparateur décimal est *toujours* précédé d'un zéro ;
- Il est *possible* d'utiliser une espace insécable pour grouper par 3 les chiffres.

Il est d'usage de ne pas isoler un groupe de 4 chiffres.

- Une espace insécable sépare le nombre et l'unité ou son symbole.
- Il n'y pas d'espace entre le préfixe et l'unité ;

Il est d'usage d'utiliser en même temps le symbole du préfixe et de l'unité.

# Notions générales

## Notation scientifique

Dans les documents techniques, il est courant de voir les nombres être inscrit avec un multiplicateur en base 10 et en ne gardant qu'un chiffre avant le séparateur décimal, selon l'équation 2.1.

$$\pm a \times 10^n \quad (2.1)$$

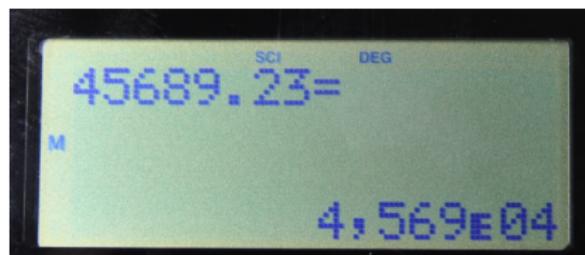


Figure 2.1 – Affichage en mode scientifique.

# Notions générales

Notation scientifique, Notation ingénieur

Une variation de la notation scientifique dans laquelle l'exposant est toujours un multiple de 3, comme dans l'équation 2.2.

$$\pm a \times 10^{3n} \quad (2.2)$$



Figure 2.2 – Affichage en mode ingénieur.

# Notions générales

## Fréquence

La *fréquence* est l'inverse de la durée d'un phénomène qui se répète (cycle).

Elle se calcule avec la formule 2.3.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

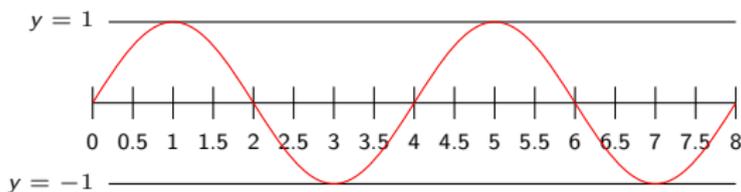


Figure 2.3 – Signal sinusoïdale de 4 secondes (0,25 Hz).

# Notions générales

Fréquence, Plages de fréquences

Tableau 2.5 – Plages de fréquence

Plage	Nom
20 Hz à 20 kHz	audio (humains)
30 kHz à 300 kHz	basse fréquence (LF)
3 MHz à 30 MHz	haute fréquence (HF)
30 MHz à 300 MHz	très haute fréquence (VHF)
1 GHz à 1000 GHz	ultra haute fréquence (UHF)

# Notions générales

## Exercices

- Combien y a-t-il de centimètres dans deux mètres ?
- Comment est exprimé  $0,250\text{ A}$  en  $\text{mA}$  ?
- Quel est l'unité de mesure de la résistance électrique ?
- Comment est écrit *56000 volts* avec un préfixe et un symbole ?
- Comment devrait on écrire le nombre *57823.5* au Québec ?

# Notions générales

## Exercices, Réponses

- ① 200
- ② 250 mA
- ③ Le ohm ( $\Omega$ )
- ④ 56 kV
- ⑤ 57 823,5

Les effets de l'électricité sont connus depuis la Grèce antique.

De nombreuses personnes ont contribué à sa compréhension comme Alessandro Volta, André-Marie Ampère, James Watt, Charles-Augustin de Coulomb, Michael Faraday, Werner von Siemens et Benjamin Franklin entre autres.

# L'électricité

## L'atome

Dans une forme très simplifiée, un atome est la plus petite composante d'une substance.

Il est formé d'un noyau, composé de *protons* et de *neutrons*, autour duquel circulent un ou plusieurs *électrons*.

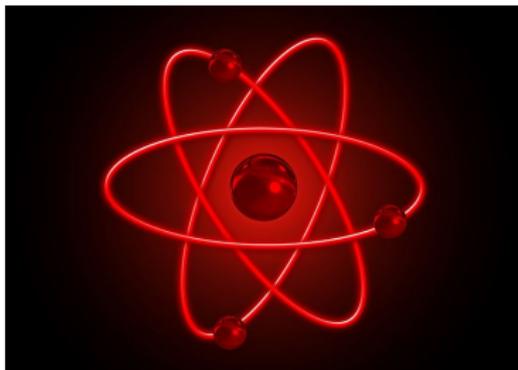


Figure 3.1 – Modèle atomique simplifié.

# L'électricité

L'atome, Neutrons

Un *neutron* est une particule subatomique possédant une charge électrique neutre.

# L'électricité

L'atome, Protons

Un *proton* est une particule subatomique possédant une charge électrique positive.

# L'électricité

L'atome, Électrons

Un *électron* est une particule subatomique possédant une charge électrique négative.

# L'électricité

## Le courant électrique

Le courant électrique est le déplacement d'une particule chargée, le plus souvent un *électron*, dans un matériau conducteur.

- Symbole :  $I$ ;
- Unité de mesure : ampère (A);
- Instrument de mesure : Ampèremètre.



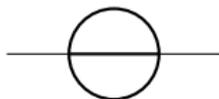
Symbole d'une source de courant.

# L'électricité

## La tension électrique

La tension électrique est une différence de potentiel électrique entre deux points.

- Symbole :  $U$  ;
- Unité de mesure : volt (V) ;
- Instrument de mesure : Voltmètre.



Symbole d'une source de tension.

# L'électricité

## La résistance électrique

La résistance électrique est l'aptitude d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique.

- Symbole :  $R$  ;
- Unité de mesure : ohm ( $\Omega$ ) ;
- Instrument de mesure : Ohmmètre.



Symbole d'une résistance.

L'inverse de la résistance se nomme *conductance* et est mesurée en siemens (S).

# L'électricité

## La résistance électrique, Conducteurs

Un conducteur électrique est un matériau qui laisse passer facilement le courant (très faible résistance).

Les matériaux suivants sont de bons conducteurs électriques (en ordre croissant de résistance) :

- Argent ;
- Cuivre ;
- Or ;
- Aluminium.

# L'électricité

## La résistance électrique, Isolants

Quand à lui, un isolant est un matériau qui laisse difficilement passer le courant (très grande résistance).

Les matériaux suivants sont de bons isolants :

- Verre ;
- Air ;
- Plastique ;
- Porcelaine.

# L'électricité

## La résistance électrique, Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la résistance change dans certaines circonstances spécifiques.

Parmi les semi-conducteurs courants, il y a le *silicium* (Si) et le *germanium* (Ge).

# L'électricité

## La loi d'Ohm

La relation entre la tension, le courant et la résistance est résumée par la *Loi d'Ohm* (3.1).

$$U = I \times R \quad (3.1)$$

# L'électricité

## La loi d'Ohm, Matériaux non-ohmiques

Certains matériaux ne se conforment pas à la loi d'Ohm et son dit *non-ohmique*.

Les filaments des ampoules à incandescence et les semi-conducteurs, que nous verrons plus loin, en sont des exemples.

# L'électricité

## La puissance électrique

La puissance électrique est le taux, par unité de temps, auquel l'énergie électrique est transférée par un circuit électrique.

- Symbole :  $P$  ;
- Unité de mesure : watt (W) ;
- Instrument de mesure : Wattmètre.

# L'électricité

La puissance électrique, L'effet Joule

Au lieu de mesurer directement la puissance électrique, on utilise la formule de l'*effet Joule* (3.2) pour calculer sa valeur.

$$P = U \times I \quad (3.2)$$

# L'électricité

## Équations supplémentaires

En combinant toutes les permutations possibles de la loi d'Ohm et de l'effet Joule, on obtient les équations 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6.

$$I = \frac{U}{R} \qquad I = \frac{P}{U} \qquad I = \sqrt{\frac{P}{R}} \qquad (3.3)$$

$$U = IR \qquad U = \frac{P}{I} \qquad U = \sqrt{PR} \qquad (3.4)$$

$$R = \frac{U}{I} \qquad R = \frac{U^2}{P} \qquad R = \frac{P}{I^2} \qquad (3.5)$$

$$P = UI \qquad P = RI^2 \qquad P = \frac{U^2}{R} \qquad (3.6)$$

# L'électricité

## Circuits électriques

Pour qu'un circuit électrique puisse fonctionner, le courant doit pouvoir retourner à la source, au travers d'une charge, formant une boucle.

Cette charge peut être composé d'une simple lampe, ou contenir des centaines de composants.

Si le courant peut retourner à son point d'origine, on parle de circuit *fermé*.

Sinon, on parle de circuit *ouvert* et aucun courant ne circulera.

Si le courant contourne la charge, on parle alors d'un *court-circuit*, ce qui entrainera une surcharge électrique et sans aucune doute un dysfonctionnement du circuit.

# L'électricité

## Circuits électriques, Schématisation des sources électriques

Dans un schéma, il arrive que l'on remplace le symbole de la source électrique par un symbole de référence.

Plusieurs symboles existent :

- Terre (*earth*) : relié à une tige enfoncée dans le sol ;
- Masse (*chassis*) : relié à un boîtier métallique ;
- Commun (*signal*) : relié à une tension commune, comme
  - La source d'alimentation ;
  - 0V (*ground*).



Symboles terre, masse, communs (2).

# L'électricité

## Électricité statique

Une **décharge électrostatique (DES)**, ESD en anglais, est souvent inoffensive pour un être humain mais peut endommagée ou détruire des composants de types *semi-conducteurs*.

Un des plus grands risques pour une personne survient lorsque qu'un courant électrique traverse son corps. C'est ce qu'on appelle une *électrisation*.

Des brûlures externes, aux points d'entrées et de sorties, ainsi qu'internes peuvent survenir.

Un courant, aussi faible que 20 mA, traversant le cœur peut engendrer une fibrillation cardiaque puis la mort.

À partir de 30 V, une tension peut être dangereuse pour une personne.

- Débrancher la source d'alimentation avant de modifier un circuit
- Faire une double vérification du câblage avant de mettre sous tension un circuit
- Travailler sur une surface sèche
- Éviter la surchauffe des composants
- Toujours couper l'alimentation électrique *avant* de toucher une personne subissant une électrisation et de lui donner les premiers soins.

- 1 Quelles sont les unités électriques qui, multipliées entre elles, donnent des watts ?
- 2 Quel est la puissance dégagée par une charge soumise à un courant de 5 A sous une tension de 15 V ?
- 3 Quelle est la tension aux bornes d'une résistance de  $10\ \Omega$  laissant circuler un courant de 2 A ?
- 4 Un circuit peut-il fonctionner sans charge ?

# L'électricité

## Exercices, Réponses

- ① Volts et ampères.
- ②  $P = U \times I \Rightarrow 5 \times 15 \Rightarrow 75 \text{ W}$ .
- ③  $U = I \times R \Rightarrow 2 \times 10 \Rightarrow 20 \text{ V}$ .
- ④ Non, on parle alors d'un circuit ouvert ou d'un court-circuit.

# Magnétisme et électromagnétisme

Certains matériaux ont la propriété physique de s'attirer ou de se repousser entre eux. On parle alors de *magnétisme*.

On peut aussi créer ce phénomène électriquement. On parle alors d'*électromagnétisme*.

# Magnétisme et électromagnétisme

## Aimants permanent

Un objet aimanté est divisée en deux *pôles*, le nord et le sud.

Les pôles opposés s'attirent et les pôles semblables s'éloignent.

Un aimant permanent est la plupart du temps fait en acier.

# Magnétisme et électromagnétisme

## Champ magnétique

Un courant circulant dans un conducteur crée un champ magnétique autour de ce conducteur.

L'intensité du champ magnétique autour du conducteur est directement proportionnelle au courant y circulant.

# Magnétisme et électromagnétisme

## Induction

Le phénomène inverse existe aussi. Lorsque qu'un conducteur traverse un champ magnétique, un courant se produit dans ce conducteur.

La tension induite dans un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique est maximale quand le taux de variation du courant est maximal.

# Magnétisme et électromagnétisme

## Exercices

- 1 Une force de répulsion existe entre deux pôles magnétiques de même nom ou de noms contraires ?
- 2 Un aimant permanent est le plus probablement fait avec quel matériel ?

# Magnétisme et électromagnétisme

## Exercices, Réponses

- ① de même nom
- ② acier

Selon la nature de la source de courant utilisée, le courant peut être catégorisé de deux manières que nous allons voir (très) rapidement pour l'instant.

# Courant continu et alternatif

## Courant continu

Le **courant continu (CC)**, **direct current (DC)** en anglais, est un courant qui ne se déplace que dans un seul sens.

Il est représenté par le symbole  $\text{---}$  sur les appareils.

A l'origine, on pensait que le courant se déplaçait du pôle positif vers le pôle négatif (sens *conventionnel*) mais dans les faits, les électrons se déplacent plutôt du pôle négatif vers le pôle positif (sens *réel*).

# Courant continu et alternatif

## Courant alternatif

Le **courant alternatif (CA)**, **alternative current (AC)** en anglais, est un courant qui *change de direction* dans le temps, oscillant entre des valeurs positives et négatives.

Il est représenté par le symbole  $\sim$  sur les appareils.

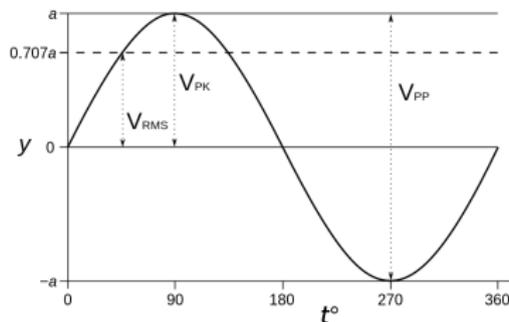


Figure 5.1 – Signal sinusoïdale avec tensions de crête et RMS.

# Courant continu et alternatif

## Courant alternatif, Valeurs efficaces

Les valeurs efficaces équivalentes **CC** sont calculées avec la *moyenne quadratique*, (root mean square (RMS)) des valeurs de *crête* (*peak*), selon les formules 5.1 et 5.2.

$$U_{RMS} = U_{PK} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5.1)$$

$$I_{RMS} = I_{PK} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5.2)$$

# Courant continu et alternatif

## Exercices

- 1 Dans quel sens se dirige le *sens conventionnel* du courant ?
- 2 Combien de fois un courant **CA** de 60 Hz change de sens en une seconde ?
- 3 Quel est la tension de crête d'un circuit de 240 V **AC** ?

# Courant continu et alternatif

## Exercices, Réponses

- ① Du positif vers le négatif.
- ② 60
- ③  $240 \times \sqrt{2} \Rightarrow 339,41 \text{ V}$

# Les fils et supports électriques

Nous allons maintenant voir comment relier physiquement et électriquement des composants.

# Les fils et supports électriques

## Les fils électriques

Un fil électrique permet le transport d'un courant électrique entre différents composants.

Il est composé d'une âme protégée par une gaine.



Figure 6.1 – Différents fils électriques.

# Les fils et supports électriques

Les fils électriques, Âme

L'âme d'un fil est un conducteur (cuivre et/ou aluminium) qui peut être :

- Plein (*solid*) : Un seul conducteur rigide ;
- Toronné (*stranded*) : Un groupe de petits conducteurs tressés ensembles.

La dimension, ou *calibre*, du conducteur est un des facteurs déterminant le courant maximal pouvant circuler dans le fil, sans surchauffer.

Ce calibre est mesuré selon la norme [International Electrotechnical Commission \(IEC\) 60228](#).

# Les fils et supports électriques

## Les fils électriques, Gaine

Le gaine (*jacket*) d'un fil est faite de matériaux isolant, comme le PVC.

Certaines informations sont souvent imprimées sur celle-ci, entre autres :

- Des marquages de longueur ;
- Le calibre du conducteur ;
- La tension maximale

La couleur d'une gaine sert habituellement à représenter une utilisation particulière :

- Rouge : Alimentation positive ;
- Noir : Alimentation négative ;
- Vert (vert et jaune) : mise à la terre (MALT).

# Les fils et supports électriques

## Câbles de liaison

Parfois, on doit relier des composants ayant des broches ou des contacts ne pouvant être enfichés sur une platine.

On utilise alors des *câbles de liaisons*.

# Les fils et supports électriques

Câbles de liaison, Pincres crocodiles

Les plus courants sont ceux munis de pincres crocodiles (*alligator clip*).

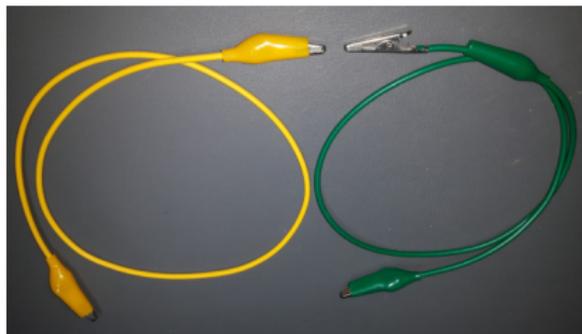


Figure 6.2 – Câbles de liaison avec pincres crocodiles.

# Les fils et supports électriques

Câbles de liaison, Bananes



Figure 6.3 – Câbles de liaison avec fiches bananes 4 mm.

# Les fils et supports électriques

## Platines d'expérimentation

Les platines d'expérimentation sont des supports en plastique munis de points d'insertions dans lequel des contacts électriques sont déjà en place.

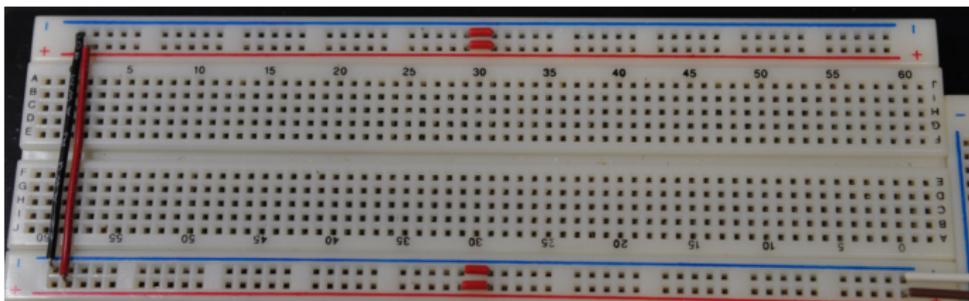


Figure 6.4 – Platines d'expérimentation « full » avec 2 « bus ».

- *Full* : 64 rangés (640 points), souvent accompagné de 2 « bus »
- *Half* : 30 rangés (300 points), souvent accompagné de 2 « bus »
- *Mini* : 17 rangés (170 points)

# Les fils et supports électriques

Platines d'expérimentation, Contacts électriques

Les points d'insertion sont identifiés par des colonnes et rangés.

Les colonnes sont identifiées par des chiffres et sont séparées en deux rangés identifiées par des lettres.

Les points d'insertion de ces sections sont reliés électriquement entre eux.

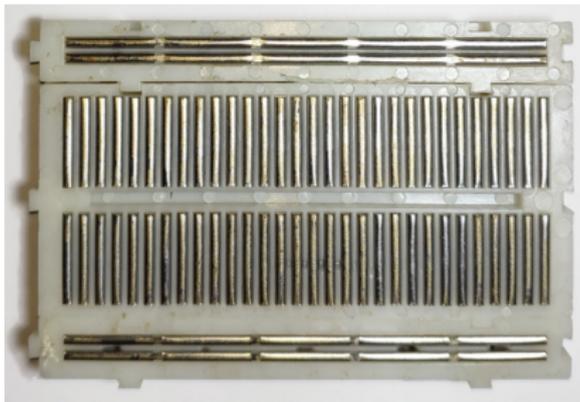


Figure 6.5 – Contacts électriques internes d'une platine d'expérimentation

# Les fils et supports électriques

Platines d'expérimentation, Cavaliers

Les différentes sections sont reliées par des *cavaliers* (*jumper wire*) de calibre 22 AWG.

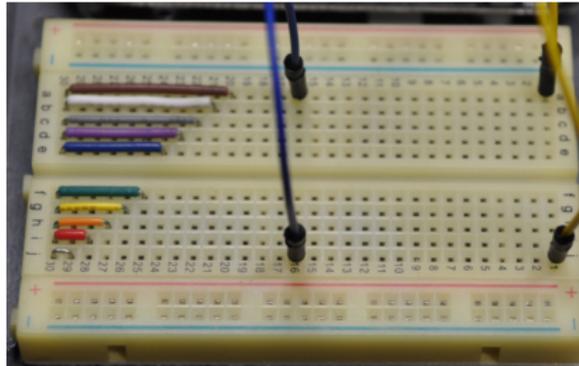


Figure 6.6 – Cavaliers préfabriqués.

# Les fils et supports électriques

Platines d'expérimentation, Adaptateurs

Les platines d'expérimentation sont conçus pour les composants à enficher (*through-hole*).

Des adaptateurs peuvent être achetés ou construit pour les autres de type de composants.

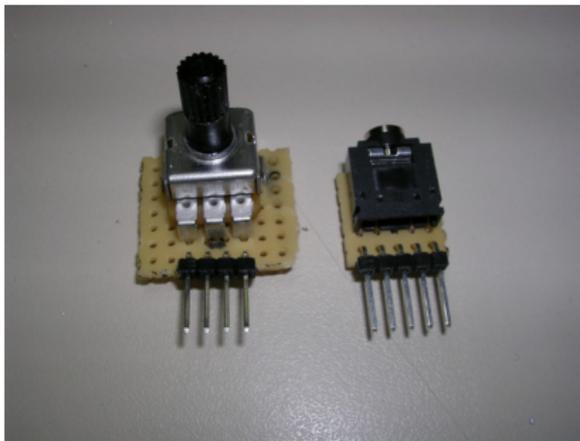


Figure 6.7 – Adaptateurs divers pour platine (potentiomètre, prise audio).

# Les fils et supports électriques

## Circuits imprimés

Les circuits imprimés (*printed circuit board*, PCB) sont des plaques en composite sur lesquelles des traces en cuivres remplacent les fils électriques.

Les composants, à insérer ou en montage de surface, sont fixés à chaud par un mélange d'étain et de plomb.

Ils sont souvent fabriqués en grande quantité dans des ateliers spécialisés pour construire des circuits permanents.

# Les fils et supports électriques

## Exercices

- 1 Entre les calibres de fils **American Wire Gauge (AWG)** 22 et 12, lequel pourras transporter le plus de courant ?
- 2 Quel fil est le plus flexible, un fil plein ou toronné ?

# Les fils et supports électriques

Exercices, Réponses

- ① AWG 12
- ② Le fil toronné

# Les fils et supports électriques

Laboratoire, Réponses

Utilisation de jumpers

# Piles et batteries

Les piles et batteries (ensemble de piles) transforment une réaction chimique en électricité CC.

Elles possèdent les principales caractéristiques suivantes :

- Une tension de source ( $U_S$ ), exprimée en volt (V) ;
- Une capacité électrique ( $q$ ), exprimée en coulombs (C) ;
- Sont munis de deux pôles :
  - Positif : *anode* (A) ;
  - Négatif : *cathode* (K).



Symboles pile et batterie (positif à gauche).

# Piles et batteries

## Les piles primaires

Ce sont des piles à usage unique.

On ne doit jamais tenter de recharger ce type de pile car elles pourraient prendre feu ou même exploser.

Nous ne verrons que les types de piles primaires les plus utilisées.

# Piles et batteries

Les piles primaires, Alcalines

Elles sont la plupart du temps de format cylindrique (AAA, AA, C, D). L'extrémité protubérante étant le pôle positif.

Chaque pile possède une tension nominale est de 1,5 V. Cette tension peut descendre à 1,2 V lors de l'utilisation dû à la *résistance interne*.



Figure 7.1 – Différents formats de piles et batteries alcalines.

# Piles et batteries

Les piles primaires, Lithium

Ce sont des piles de formats cylindriques et boutons.

Leurs tensions nominales sont comprises entre 1,5 V à 3,7 V, selon le modèle



Figure 7.2 – Différents formats de piles boutons lithium.

Elles sont préférées pour des utilisations où un courant faible sur de longues périodes est désiré, comme dans des calculatrices ou des montres.

# Piles et batteries

## Les piles secondaires

Ce type de pile, aussi appelé *accumulateur*, peut être rechargé un certain nombre de fois. Par contre, le chargeur doit être compatible à la chimie de la pile.

En pratique, le nombre de recharge dépend de plusieurs facteurs dont le cycle de recharge. Dans certaines circonstances très particulières, il est possible que la pile ne puisse être rechargée à sa pleine capacité. Ce phénomène est appelé *effet mémoire*. Certaines batterie utilise un système de gestion, [Battery Management System \(BMS\)](#), pour contrer ce phénomène.

Comme il existe beaucoup de type et de variante de piles secondaire, nous ne verrons que les plus utilisés.

# Piles et batteries

Les piles secondaires, Plomb

Ces piles sont formées de plaques de plomb dans un acide (liquide ou gel).

Elles possèdent une tension nominale de 2,1 V mais sont généralement utilisées en batterie de 12 V (6 cellules).



Figure 7.3 – Batterie automobile au plomb de 12V.

# Piles et batteries

Les piles secondaires, Nickel-métal-hydrure

Les piles **nickel-métal-hydrure (Ni-MH)** possèdent une tension nominale de 1,2 V.

Le principal inconvénient est la tendance à l'autodécharge. Par contre, depuis 2005, il existe des piles **Ni-MH** à faible autodécharge.



Figure 7.4 – Piles Ni-MH (AAA et AA) avec adaptateurs (C et D).

# Piles et batteries

Les piles secondaires, Lithium-ion

Apparue en 1991, les piles **lithium-ion (Li-ion)** possèdent une tension nominale de 3,6 ou 3,7 V.

Elles ont une tendance à l'emballement thermique, provoquant parfois des incendies.



Figure 7.5 – Pile lithium-ion.

# Piles et batteries

Les piles secondaires, Lithium-fer-phosphate

Apparue vers 2007, les piles **lithium-fer-phosphate (LiFePO<sub>4</sub>)** sont une variante plus sécuritaire des piles **Li-ion**. Elles possèdent une tension nominale de 3,2V.



Figure 7.6 – Batterie LiFePO<sub>4</sub>.

# Piles et batteries

## Branchements

Dans le cas de piles ou de batteries, *du même type*, il est possible d'en brancher plusieurs ensembles, afin d'augmenter la tension ou le courant.

# Piles et batteries

## Branchements, Série

Caractéristiques :

- La tension s'additionne
- L'intensité et la capacité restent les mêmes

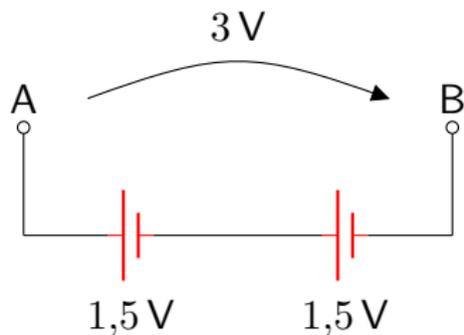


Figure 7.7 – Piles branchées en série.

# Piles et batteries

## Branchements, Parallèle

Caractéristiques :

- La tension reste la même
- L'intensité et la capacité s'additionnent

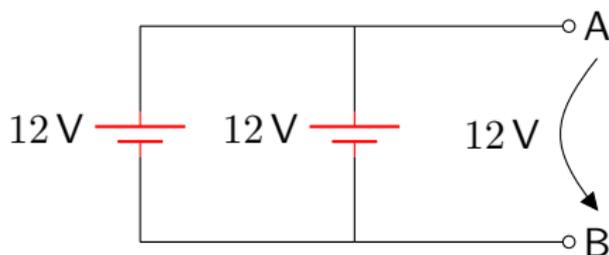


Figure 7.8 – Piles branchées en parallèle.

# Piles et batteries

## Exercices

- 1 Quel est le nombre minimal de piles alcaline requises pour construire une source d'alimentation de 12V et branchées comment ?
- 2 Quel est le nombre minimal de piles Ni-MH requise pour construire une source d'alimentation de 12V et branchées comment ?
- 3 Quel seras la tension de 8 piles Ni-MH branchées en série ?

# Piles et batteries

## Exercices, Réponses

①  $\frac{12}{1,5} \Rightarrow 8$  piles en série

②  $\frac{12}{1,2} \Rightarrow 10$  piles en série

③  $8 \times 1,2 \Rightarrow 9,6 \text{ V}$

# Les coupe-circuits

Les coupe-circuits sont des dispositifs de protection qui sont insérés en *série* dans un circuit électrique.

Ils fonctionnent en ouvrant le circuit lors du dépassement d'une certaine valeur de courant.

Ces dispositifs ont en commun d'avoir des limites maximales sur les valeurs suivantes :

- Courant
- Tension
- Vitesse d'action

# Les coupe-circuits

## Les fusible

Un *fusible* (*fuse*) est un emballage contenant un filament qui « bruleras » lors d'une surintensité, ouvrant ainsi le circuit.



Symbole d'un fusible.

# Les coupe-circuits

Les fusible, Cylindriques

Ce sont des fusibles, souvent en verre, avec un contact à chaque extrémités.



Figure 8.1 – Différents fusibles cylindriques.

# Les coupe-circuits

Les fusible, Lames

Ce sont des fusibles « plats » en plastique, les contacts étant côte à côte.

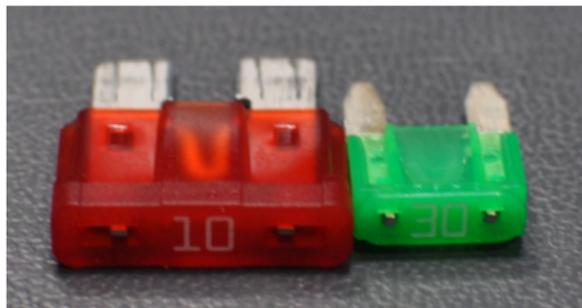


Figure 8.2 – Différents fusibles à lames.

# Les coupe-circuits

## Les disjoncteurs

Un disjoncteur (*breaker*) est un dispositif mécanique réarmable.

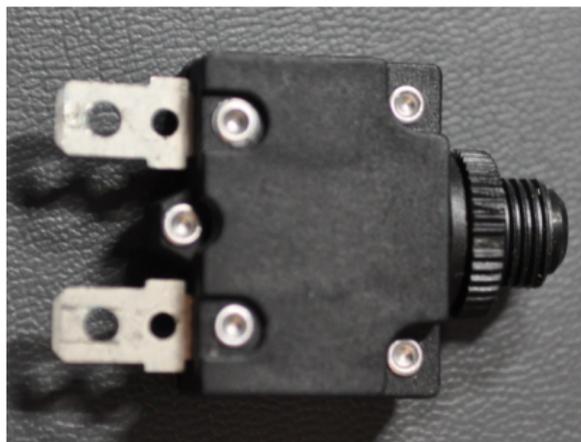


Figure 8.3 – Disjoncteur.

# Les coupe-circuits

## Fusibles réarmables

Un fusible réarmable à **coefficient en température positif (CTP)** n'est pas à proprement parlé un fusible. Ses principales caractéristiques sont de ne contenir aucun filament et de se réarmer de lui-même.

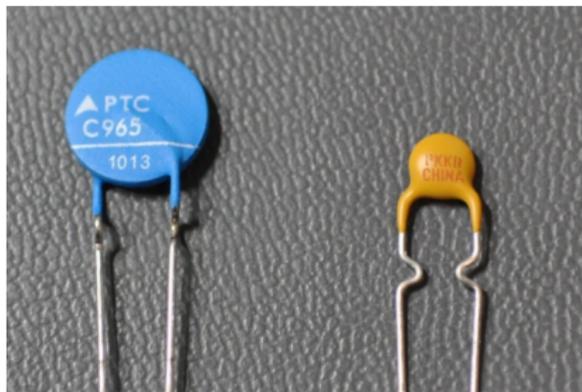


Figure 8.4 – Fusibles réarmables CTP.

# Les coupe-circuits

## Exercices

- 1 Doit on remplacer un disjoncteur après son déclenchement ?

# Les coupe-circuits

## Exercices, Réponses

- 1 Non, simplement le réenclencher

# Les interrupteurs

Un interrupteur (*switch*) est un dispositif mécanique permettant d'ouvrir ou de fermer un circuit. Certains interrupteurs permettent aussi de rediriger un signal électrique.



Figure 9.1 – Différents types d'interrupteurs.

# Les interrupteurs

## Boutons poussoirs

Les boutons poussoirs sont des interrupteurs dont la position peut être *temporairement* modifiées.

- Normalement ouvert : **normally open (NO)**
- Normalement fermé : **normally close (NC)**



Symboles d'interrupteurs (NO, NC).

# Les interrupteurs

## Directionnels

Leurs positions peuvent être modifiées.

- Unipolaire unidirectionnel : **single position single throw (SPST)**
- Unipolaire bidirectionnel : **single position double throw (SPDT)**
- Bipolaire unidirectionnel : **double position single throw (DPST)**
- Bipolaire bidirectionnel : **double position double throw (DPDT)**



Symboles d'interrupteurs (SPST, DPST).

# Les interrupteurs

## Exercices

- 1 Un interrupteur permet il de varier l'intensité d'un courant ?

# Les interrupteurs

Exercices, Réponses

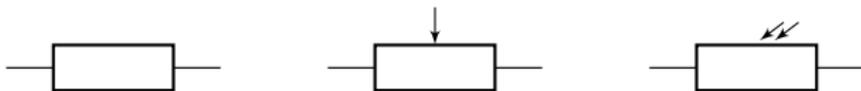
① Non

# Les résistances

Les résistances (*resistor*) sont des composants servant à réduire le courant dans un circuit.

Elles possèdent les caractéristiques principales suivantes :

- Résistance : ohm ( $\Omega$ );
- Tolérance : %;
- Puissance maximale : watt (W),



Symbole d'une résistance, potentiomètre et photorésistance ( $R$ ).

# Les résistances

## Types de résistances

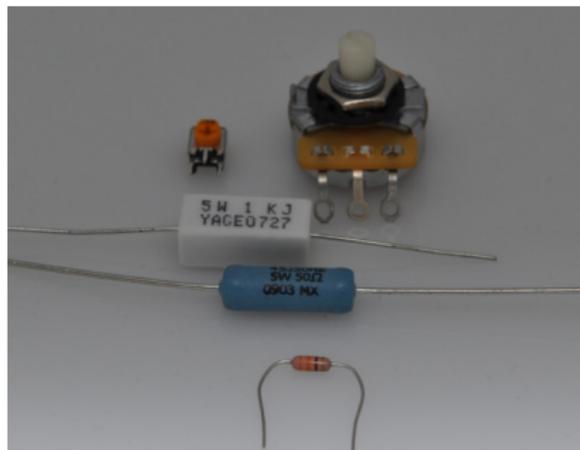


Figure 10.1 – Résistances diverses.

# Les résistances

Types de résistances, Résistances à valeur fixe

Ce type de résistance est souvent composé de carbone mais peut aussi être fait d'un fil enroulé autour d'un noyau non conducteur (*wirewound*).

Il existe aussi des résistances faites de céramique et pouvant dissiper une plus grande puissance.

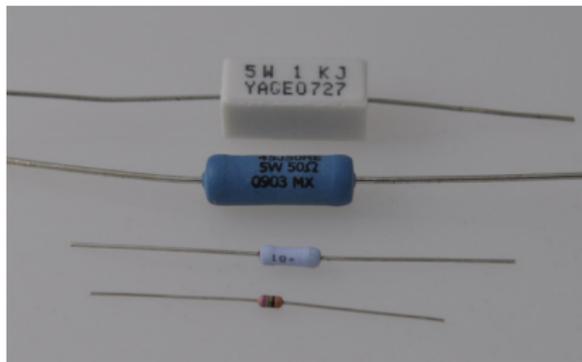


Figure 10.2 – Résistances à valeurs fixes.

Les puissances communes sont de  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1, 2 et 5 W.

# Les résistances

Types de résistances, Potentiomètre

Un potentiomètre est une résistance muni de trois broches.

La broche du milieu (*wiper*) est un contact qui permet de varier la résistance en rapport aux deux autres broches.

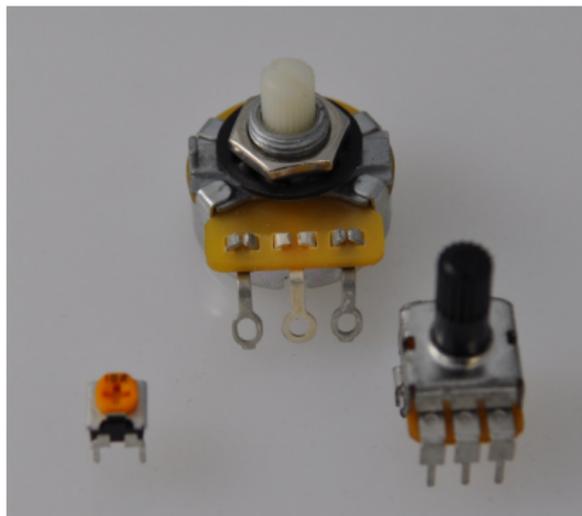


Figure 10.3 – Potentiomètres divers.

# Les résistances

Types de résistances, Photorésistance

Une photorésistance est une résistance dont la valeur, d'une manière linéaire, change selon la quantité de lumière qui frappe sa surface.



Figure 10.4 – Photorésistance.

Contrairement aux autres types de résistances, elles sont composées de matériaux semi-conducteurs.

# Les résistances

## Marquage alphanumérique

Le séparateur décimal et la tolérance sont alors remplacés par des lettres.

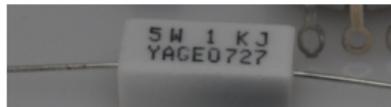
Tableau 10.1 – Code RMK (partiel) pour résistance

Lettre	Préfixe	Tolérance
L	milli	
R	-	
F	-	$\pm 1\%$
G	-	$\pm 2\%$
K	kilo	$\pm 10\%$
M	mega	$\pm 20\%$
G	giga	
T	tera	
J		$\pm 5\%$

# Les résistances

Marquage alphanumérique, Lecture

- La première lettre représente la position décimale ;
- La deuxième lettre représente la tolérance.



Résistance de  $1\text{ k}\Omega$ ,  $\pm 5\%$

# Les résistances

## Marquage de couleurs

Tableau 10.2 – Code de couleur (partiel) IEC 60062

Couleur	Valeur	Multiplicateur	Tolérance
Absent	-	-	±20%
Argent	-	$10^{-2}$	±10%
Or	-	$10^{-1}$	±5%
Noir	0	$10^0$	-
Brun	1	$10^1$	±1%
Rouge	2	$10^2$	±2%
Orange	3	$10^3$	±0,05%
Jaune	4	$10^4$	±0,02%
Vert	5	$10^5$	±0,5%
Bleu	6	$10^6$	±0,25%
Violet	7	$10^7$	±0,10%
Gris	8	$10^8$	±0,01%
Blanc	9	$10^9$	-

# Les résistances

Marquage de couleurs, Lecture

Selon le nombre de bandes :

- 3 : 1<sup>er</sup> nombre, 2<sup>e</sup> nombre, multiplicateur
- 4 : 1<sup>er</sup> nombre, 2<sup>e</sup> nombre, multiplicateur, tolérance
- 5 : 1<sup>er</sup> nombre, 2<sup>e</sup> nombre, 3<sup>e</sup> nombre, multiplicateur, tolérance
- 6 : 1<sup>er</sup> nombre, 2<sup>e</sup> nombre, 3<sup>e</sup> nombre, multiplicateur, tolérance, **Temperature coefficient of resistance (TCR)**



Résistance de  $845 \text{ k}\Omega$ ,  $\pm 1 \%$

# Les résistances

## Applications

Les principaux usages de résistances.

# Les résistances

Applications, Limiteur de courant

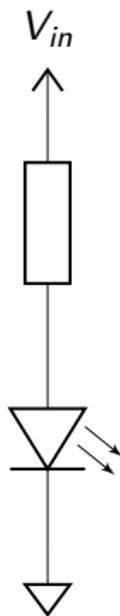


Figure 10.5 – Limiteur de courant.

# Les résistances

Applications, Diviseur de tension

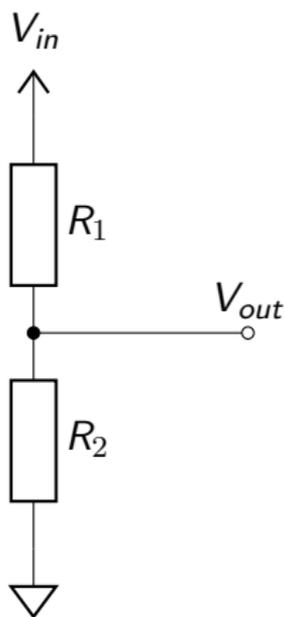


Figure 10.6 – Diviseur de tension.

# Les résistances

Applications, Résistances de rappel

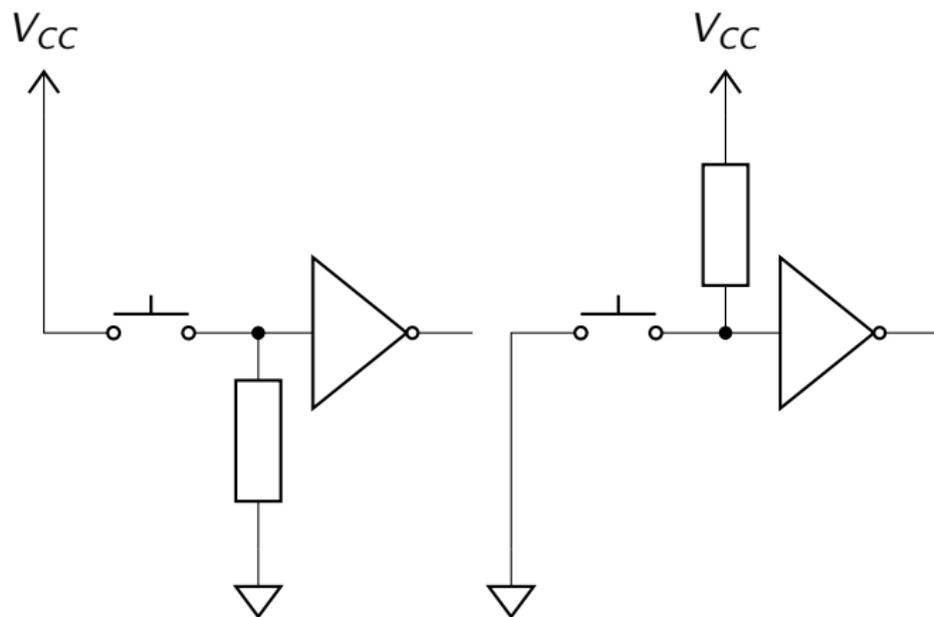


Figure 10.7 – Résistances de rappel (niveau bas et niveau haut).

# Les résistances

## Réseaux et résistance équivalente

Il est possible de faire des « réseaux » de résistances pour atteindre une valeur ou une puissance spécifique.

# Les résistances

Réseaux et résistance équivalente, Série

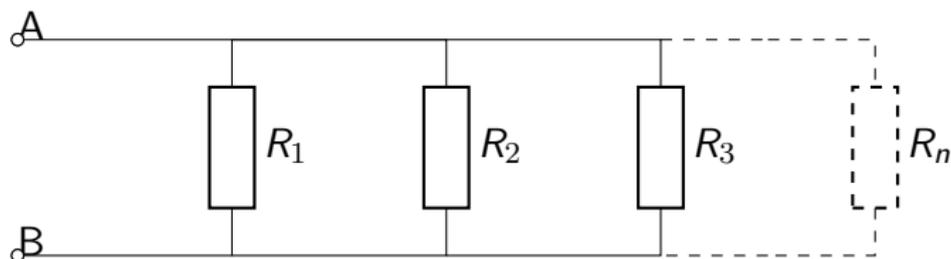


$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \cdots R_n \quad (10.1)$$

- La tension est la somme des tension aux bornes de chaque résistances
- Le courant est le même à travers le circuit.

# Les résistances

Réseaux et résistance équivalente, Parallèle



$$R_{eq} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \cdots 1/R_n} \quad (10.2)$$

- La tension est la même aux bornes de chaque résistances ;
- Le courant est la somme des courants à travers le circuit.

# Les résistances

## Exercices

Une résistance avec les couleurs rouge, violet, brun et or.

Quels sont :

- Sa valeur attendue
- Sa tolérance
- Sa plage de valeur réelle

# Les résistances

## Exercices, Réponses

①  $2,7,1 \Rightarrow 27 \times 10^1 \Rightarrow 270 \Omega$

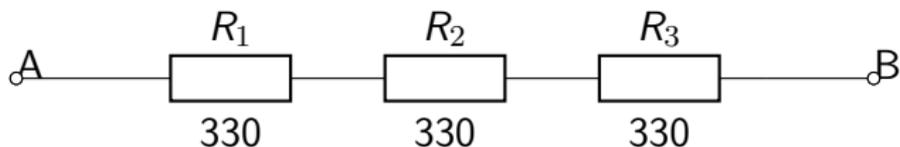
②  $\pm 5 \%$

③  $256,5 \Omega \text{ à } 283,5 \Omega$

# Les résistances

## Exercices

À partir du circuit suivant :



En supposant une tension de 10 V aux bornes du circuit, calculer :

- La résistance équivalente
- Le courant dans chacune des résistances
- La tension aux bornes de chacune des résistances
- La puissance de chacune des résistances

# Les résistances

## Exercices, Réponses

①  $R_{eq} = 330 + 330 + 330 \Rightarrow 990 \Omega$

②  $I = \frac{10}{990} \Rightarrow 0,01 \text{ A}$

③ La tension aux bornes de chacune des résistances :

- $U_{R_1} = 330 \times 0,01 \Rightarrow 3,3 \text{ V}$

- $U_{R_2} = 330 \times 0,01 \Rightarrow 3,3 \text{ V}$

- $U_{R_3} = 330 \times 0,01 \Rightarrow 3,3 \text{ V}$

④ La puissance de chacune des résistances :

- $P_{R_1} = 3,3 \times 0,01 \Rightarrow 0,03 \text{ W}$

- $P_{R_2} = 3,3 \times 0,01 \Rightarrow 0,03 \text{ W}$

- $P_{R_3} = 3,3 \times 0,01 \Rightarrow 0,03 \text{ W}$

# Les condensateurs

Un condensateur (*capacitor*) sert à emmagasiner une charge électrique. Il possède les caractéristiques principales suivantes :

- Capacitance : farad (F) ;
- Tension maximale : volt (V).



Symboles de condensateurs (non polarisé, polarisé) (C).

# Les condensateurs

## Fabrication

Un condensateur est fabriqué par des plaques de métal (armatures) séparées par un diélectrique (isolant).

Le diélectrique, la surface des plaques, leurs nombres et la distance entre celles-ci déterminent la capacité d'un condensateur.

# Les condensateurs

## Fonctionnement

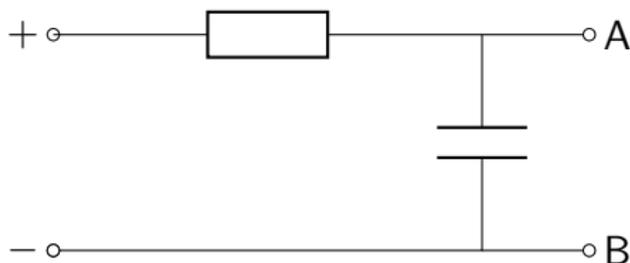
Lorsque que mis sous tension, le courant circule jusqu'à ce que les tensions électriques sur les deux plaques soient égales. A partir de ce moment, plus aucun courant ne passe et on dit que le condensateur est chargé.

En coupant la source de courant, le condensateur va libéré la charge emmagasinée, jusqu'à ce que les tension des plaques soient de nouveau égales.

# Les condensateurs

Fonctionnement, Constate de temps

Dans circuit simplifié comme le suivant :



Le temps que prendra un condensateur à se « charger » se calcule avec la formule [11.1](#).

$$\tau = R \times C \quad (11.1)$$

Ce qui équivaut à 63,2% de la tension et 36,8% de l'intensité.

On considère un condensateur complètement chargé après  $5\tau$ .

# Les condensateurs

## Types de condensateurs

Le type d'un condensateur dépend principalement de son diélectrique.

Voici les principaux.

# Les condensateurs

Types de condensateurs, Condensateurs variables

Ce sont souvent des condensateurs utilisant l'air comme diélectrique.

Les plaques de la partie mobile (rotor) s'emboîtent dans celles de la partie fixe (stator), changeant la valeur du condensateur selon l'aire de la surface mise en parallèle.

# Les condensateurs

Types de condensateurs, Condensateurs en céramique

Condensateurs à valeurs fixes d'on le diélectrique est fait de céramique.



Figure 11.1 – Condensateur en céramique.

# Les condensateurs

Types de condensateurs, Condensateurs à film

Le diélectrique est fait d'un film plastique.

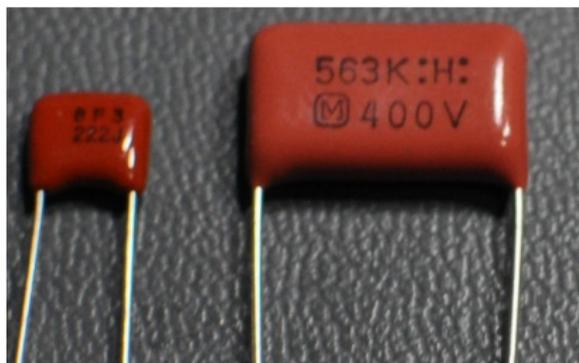


Figure 11.2 – Condensateurs à film.

# Les condensateurs

Types de condensateurs, Condensateurs électrolytiques

Ce type de condensateur est polarisé.

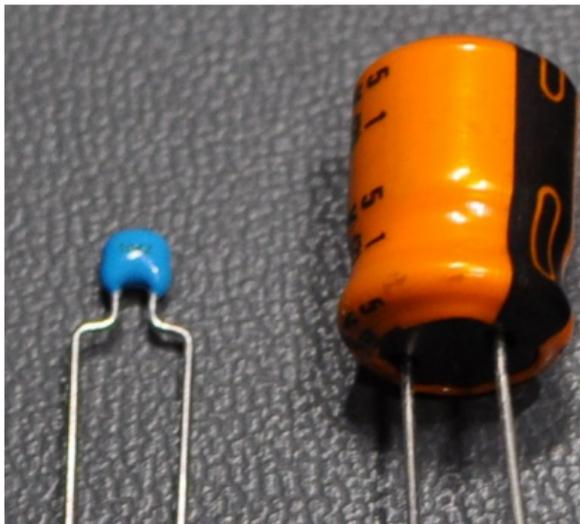


Figure 11.3 – Condensateurs électrolytiques tantalum et aluminium.

# Les condensateurs

## Applications

Voici les principaux usages des condensateurs.

# Les condensateurs

## Applications, Découplage

Installés en parallèle près des broches d'alimentation d'un circuit **CC**, ils permettent d'atténuer les variations de tension.

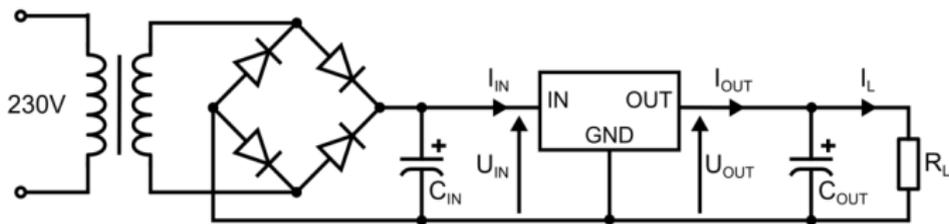


Figure 11.4 – Condensateurs de découplage dans un circuit d'alimentation.

# Les condensateurs

## Applications, Filtres

Ils sont aussi utilisés pour faire des *filtres* qui permettent de bloquer ou laisser passer certaines fréquences.

# Les condensateurs

## Réseaux et capacitance équivalente

Tout comme les résistances, les condensateurs peuvent être branchés entre eux en série et en parallèle.

# Les condensateurs

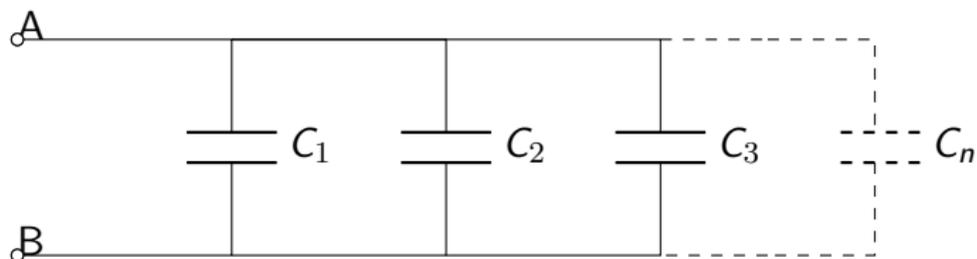
Réseaux et capacitance équivalente, Série



$$C_{eq} = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3 \dots 1/c_n} \quad (11.2)$$

# Les condensateurs

Réseaux et capacitance équivalente, Parallèle



$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \cdots C_n \quad (11.3)$$

# Les condensateurs

## Exercices

- 1 En branchant deux condensateurs de  $20\ \mu\text{F}$  en série, quel est la capacité résultante ?
- 2 Si vous branchez deux condensateurs de  $24\ \mu\text{F}$  en parallèle, quelle est la capacité de la combinaison ?

# Les condensateurs

## Exercices, Réponses

$$\textcircled{1} \frac{0,000\,020}{2} = 0,000\,010 \Rightarrow 10\ \mu\text{F}$$

$$\textcircled{2} 0,000\,024 \times 2 = 0,000\,048 \Rightarrow 48\ \mu\text{F}$$

Une bobine (*inductor*) s'oppose aux changements de *courant*.

Elles possèdent les caractéristique suivantes :

- Inductance : henry (H)



Symbole d'une bobine ( $L$ ).

# Les bobines

## Fabrication

Une bobine est formée d'un conducteur enroulé autour d'un noyau. Ce noyau est le plus souvent ferreux.

Le type de matériel utilisé pour le noyau, son diamètre et sa longueur ainsi que le nombre de tour du conducteur détermine sa valeur.

# Les bobines

## Fonctionnement

Un *courant* circulant dans un conducteur entraîne la formation d'un champ magnétique perpendiculaire au conducteur.

Ce champ magnétique s'oppose aux fluctuations du courant. Un courant continu y circule sans restriction.

Lorsque la source de courant est coupée, le champ magnétique s'effondre (*collapse*) et crée un courant de sens inverse dans le conducteur de la bobine.

# Les bobines

## Types

Nous allons voir un bref aperçu de différents types de bobines.

# Les bobines

Types, Air

Ce type de bobine est simplement un conducteur isolé et enroulé.

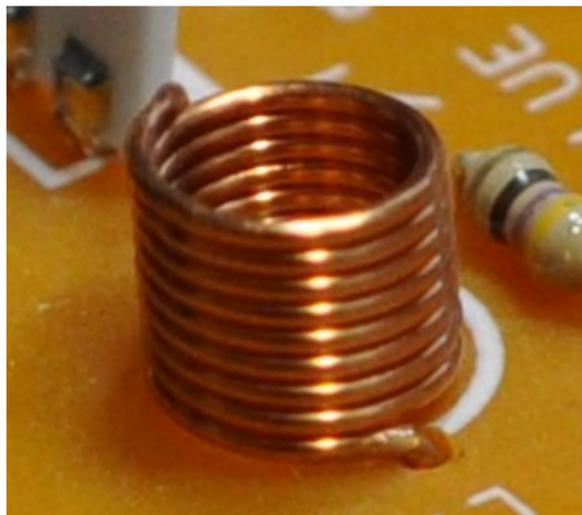


Figure 12.1 – Bobine à air.

# Les bobines

## Types, Ferrite

Ce type de bobine est semblable à une bobine à air mais le noyau est un corps ferreux, appelé *ferrite*. Ce noyau peut parfois être ajustable.

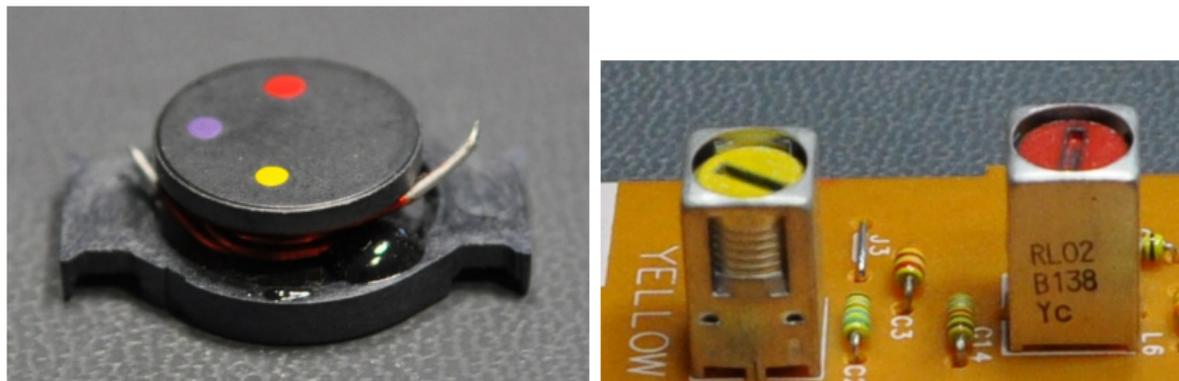


Figure 12.2 – Bobines à ferrite (fixe, variables).

# Les bobines

Types, Toroïdal

Ce type de bobine est composé d'un conducteur enroulé autour d'un anneau de ferrite.



Figure 12.3 – Bobine toroïdal.

# Les bobines

## Applications

Voici quelques applications utilisant des bobines.

# Les bobines

Applications, Lissage d'une alimentation ou signal

Suppression de signaux parasites sur des câbles de communications ou d'alimentation.

Le conducteur passe dans un tube de ferrite. Il peut parfois faire plusieurs tours.



Figure 12.4 – Ferrite autour d'un fil.

# Les bobines

## Applications, Filtres

Ils sont aussi utilisés pour faire des *filtres* qui permettent de bloquer ou laisser passer certaines fréquences.

# Les bobines

## Réseaux et inductance équivalente

Tout comme les résistances et les condensateurs, les bobines peuvent être branchées entre elles en série et en parallèle.

# Les bobines

## Réseaux et inductance équivalente, Série

Dans un circuit contenant plusieurs bobines en *série*, l'inductance équivalente ( $L_{eq}$ ) entre les points  $A$  et  $B$  est représentée par l'équation 12.1

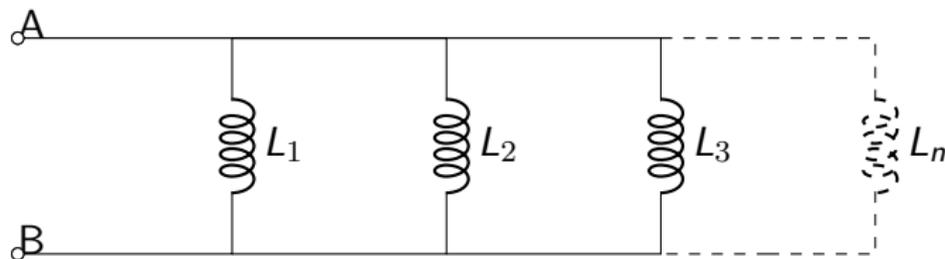


$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 \cdots L_n \quad (12.1)$$

# Les bobines

## Réseaux et inductance équivalente, Parallèle

Dans un circuit contenant plusieurs bobines en *parallèle*, l'inductance équivalente ( $L_{eq}$ ) entre les points  $A$  et  $B$  est représentée par l'équation 12.2



$$L_{eq} = \frac{1}{1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 \cdots 1/L_n} \quad (12.2)$$

# Les bobines

## Exercices

- 1 Si vous branchez deux bobines de 12 mH en série, quelle est l'inductance de la combinaison ?

# Les bobines

## Exercices, Réponses

①  $0,012 \times 2 = 0,024 \Rightarrow 24 \text{ mH}$

# Réactance et impédance

Maintenant nous allons voir les effets des résistances, condensateurs et bobines combinés.

# Réactance et impédance

## Réactance

La réactance est un effet de résistance sur un circuit capacitif ou inductif.

- Symbole :  $X$
- Unité de mesure : ohm ( $\Omega$ )

Une réactance positive sera qualifiée d'inductive, alors qu'une réactance négative sera qualifiée de capacitive.

# Réactance et impédance

## Réactance, Capacitive

La réactance capacitive est *inversement* proportionnelle à la fréquence et est calculée avec l'équation 13.1.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (13.1)$$

Où :

- $X_C$  : la réactance capacitive, en ohms ( $\Omega$ )
- $\pi$  : la constante *pi* (3.14)
- $f$  : la fréquence, en hertz (Hz)
- $C$  : la capacitance, en farads (F)

# Réactance et impédance

## Réactance, Inductive

La réactance inductive est proportionnelle à la fréquence et est calculée avec l'équation 13.2.

$$X_L = 2\pi fL \quad (13.2)$$

Où :

- $X_L$  : la réactance inductive, en ohms ( $\Omega$ )
- $\pi$  : la constante *pi* (3.14)
- $f$  : la fréquence, en hertz (Hz)
- $L$  : l'inductance, en henrys (H)

# Réactance et impédance

## Impédance

L'impédance est la somme de la résistance et de la réactance.

- Symbole :  $Z$
- Unité de mesure : ohm ( $\Omega$ )

Calculée avec l'équation 13.3.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (13.3)$$

Où :

- $Z$  : l'impédance, en ohms ( $\Omega$ )
- $R$  : la résistance, en ohms ( $\Omega$ )
- $X_L$  : la réactance inductive, en ohms ( $\Omega$ )
- $X_C$  : la réactance capacitive, en ohms ( $\Omega$ )

# Réactance et impédance

## Résonance

Un circuit est dit résonnant quand les réactances conductives et inductives sont égales.

Elle est calculée avec l'équation 13.4.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13.4)$$

L'ajout d'une résistance dans le circuit n'influence pas la fréquence de résonance (circuit LCR).

# Réactance et impédance

## Circuits

Différents combinaisons de circuits peuvent être faites, en série et en parallèle.

# Réactance et impédance

## Circuits, RL

Une résistance et une bobine.

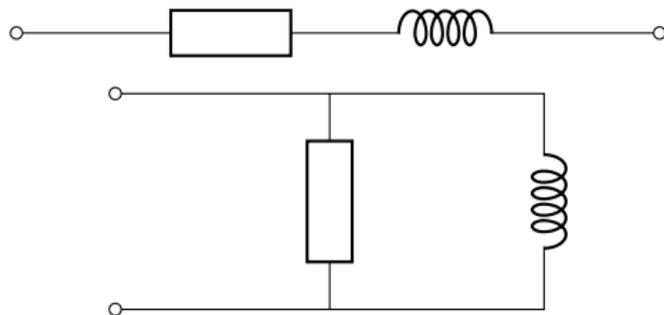


Figure 13.1 – Circuits RL : série et parallèle.

# Réactance et impédance

## Circuits, RC

Une résistance et un condensateur.

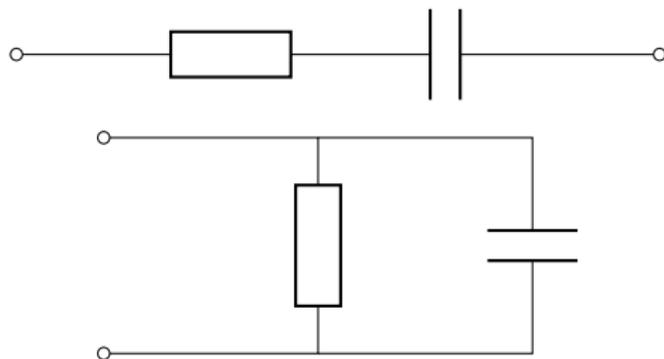


Figure 13.2 – Circuits RC : série et parallèle.

# Réactance et impédance

## Circuits, LC

Une bobine et un condensateur.

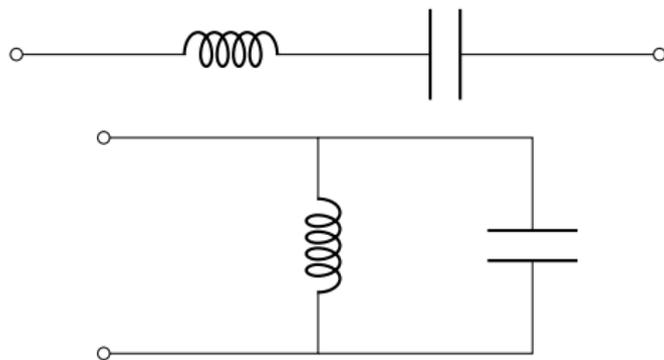


Figure 13.3 – Circuits LC : série et parallèle.

# Réactance et impédance

## Circuits, RLC

Une résistance, une bobine et un condensateur.

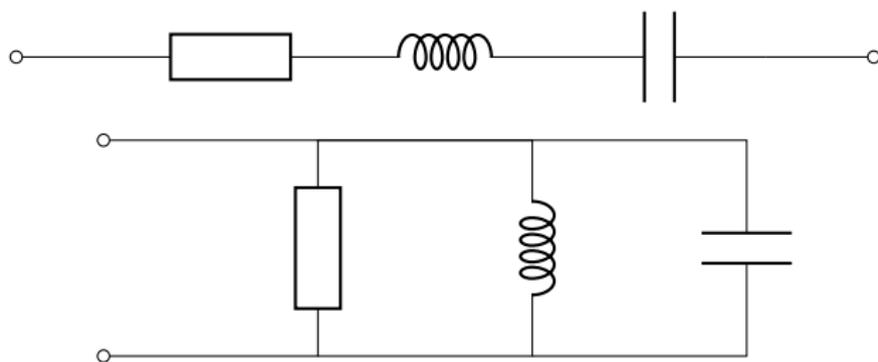


Figure 13.4 – Circuits RLC, série et parallèle.

# Réactance et impédance

## Exercices

- 1 Lorsqu'on applique une tension alternative de fréquence variable aux bornes d'une bobine montée en parallèle avec un condensateur, on constate que l'impédance atteint son maximum à une fréquence donnée. Cette fréquence est nommé :
- 2 La résonance est la condition qui existe quand :

# Réactance et impédance

## Exercices, Réponses

- ① La fréquence de résonance
- ② La réactance inductive et la réactance capacitive sont égales

# Transformateurs

Un transformateur (*transformer*) est un composant servant à augmenter ou abaisser une tension électrique [CA](#).

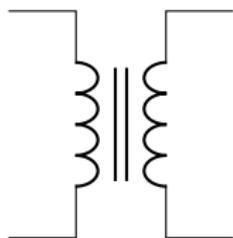


Figure 14.1 – Transformateur (T).

# Transformateurs

## Fabrication

Un transformateur est en fait deux bobines enroulées sur le même noyau.

Ce noyau peut être une simple ferrite ou être un assemblage de fines lamelles métalliques dans un même boîtier.

# Transformateurs

## Fonctionnement

Un courant **CA** aux bornes de la bobine *primaire* en induit un autre aux bornes de la bobine *secondaire*.

Selon le ratio entre le nombre de tours entre le primaire et le secondaire, les transformateurs sont considérés :

- éleveurs (*step-up*) ;
- abaisseurs (*step-down*).

# Transformateurs

## Applications

Voici quelques usages des transformateurs.

# Transformateurs

Applications, Isolation

Transformateur ayant rapport 1 : 1.

Il sert à protéger un circuit AC d'une tension CC accidentelle, comme par exemple la foudre.

# Transformateurs

## Applications, Baluns

Lorsque l'impédance d'un circuit doit être ajusté pour un autre circuit.

Souvent utilisé pour « matcher » des circuits RF.



Figure 14.2 – Balun.

# Transformateurs

Applications, Transformateur d'alimentation

Un transformateur utilisé pour abaisser la tension secteur 120 V en une tension plus basse ( $< 50$  V).

Il est souvent le premier élément d'un bloc d'alimentation CC.



Figure 14.3 – Transformateur d'alimentation.

# Transformateurs

## Exercices

- 1 Un transformateur avec un secondaire unique de  $12\text{ V}$  consomme  $0,5\text{ A}$  sur son primaire de  $120\text{ V}$ . En supposant qu'il n'y ait aucune perte, quel est le courant débité au secondaire ?
- 2 Un transformateur survolteur comprend un primaire et un secondaire dont le rapport de transformation est de  $1 : 5$ . En supposant un rendement parfait, quel est le courant primaire si le secondaire fournit  $50\text{ mA}$  ?

# Transformateurs

## Exercices, Réponses

① Puissance en entrée :  $0,5 \times 120 \Rightarrow 60 \text{ W}$

Courant en sortie :  $\frac{60}{12} \Rightarrow 5 \text{ A}$

②  $0,05 \times 5 = 0,250 \Rightarrow 250 \text{ mA}$

# Haut-parleurs

Un haut-parleur permet de reproduire un son à partir d'un signal électrique.

Ces caractéristiques importantes sont :

- Impédance : ohm ( $\Omega$ );
- Puissance maximale : watt (W).



Symbole d'un haut-parleur (LS).



Figure 15.1 – Haut-parleur

# Haut-parleurs

Un haut-parleur est composé d'une membrane reliée à une bobine à air. Cette bobine est placée autour d'un aimant permanent fixé au bâti du haut-parleur.

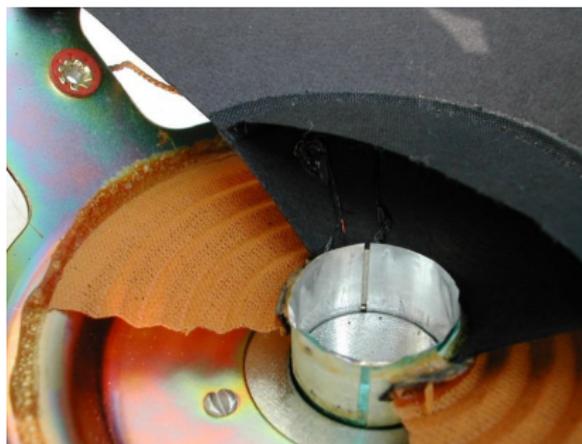


Figure 15.2 – Intérieur d'un haut-parleur

# Haut-parleurs

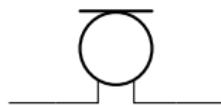
## Fonctionnement

Les variations de courant induisent un champ magnétique qui interagit avec l'aimant, faisant vibrer la membrane et créant une onde sonore de même fréquence que le signal électrique.

# Haut-parleurs

## Les microphones

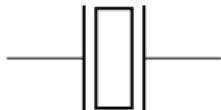
On peut considérer un microphone comme l'inverse d'un haut-parleur : il permet de convertir une onde sonore en un signal électrique.



Symbole d'un microphone (*MK*).

# Les quartz

Un quartz (*crystal oscillator*) est un composant qui oscille à une certaine fréquence et ce de manière stable lorsqu'il est stimulé électriquement.



Symbole d'un quartz (Y).



Figure 16.1 – Quartz.

# Les quartz

## Applications, Réponses

Ils sont utilisés dans les circuits requérant une fréquence très stable.

Les circuits numériques utilisent presque tous au moins un quartz pour synchroniser les différentes opérations.

Les appareils de communication radio en utilisent aussi.

Les diodes sont des composants à semi-conducteur formé d'une jonction *P-N*.

Elles ont pour principale caractéristique de ne laisser passer le courant que dans un sens, c'est à dire de l'anode (*A*) vers la cathode (*K*).

# Les diodes

## Fonctionnement

Lorsqu'une diode est branchée en *polarisation directe*, elle laisse passer le courant mais seulement une fois que sa *tension de seuil* (forward-threshold voltage), appelée  $V_F$ , est atteinte.

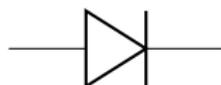
Cette « perte » de tension doit être considérée lors des calculs.

Branchée en *polarisation inverse*, la diode ne laisse passer qu'un faible courant de fuite (*leakage*) appelé  $I_S$ .

# Les diodes

## Diodes à usage général

- $V_F$  :
  - Silicium :  $\approx 0,7V$
  - Germanium :  $\approx 0,3V$  à  $0,4V$
- Puissance maximale ( $P_{MAX}$ )



Symbole d'une diode à usage général ( $D$ ).



Figure 17.1 – Diodes à usage général

# Les diodes

## Diodes à usage général, Redressement

Les diodes à usage général sont souvent utilisées pour convertir un courant alternatif en un courant continu pulsatif.

Seulement la partie positive du signal peut passer.

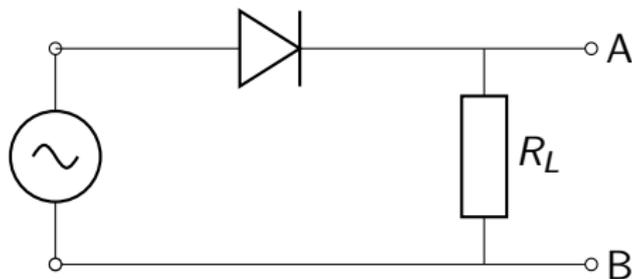


Figure 17.2 – Circuit redresseur.

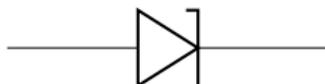
# Les diodes

## Les diodes Zener

Contrairement à une diode conventionnelle en polarisation inverse, une diode Zener est capable de laisser partir un courant mais seulement à partir d'une certaine tension dite *Tension Zener*.

Leurs caractéristique principales sont :

- Tension Zener ( $V_Z$ );
- Puissance de dissipation maximale.



Symbole d'une diode Zener.

# Les diodes

## Les diodes Zener, Régulateur de tension

En polarisation inverse, une fois la tension Zener ( $V_Z$ ) atteinte, une diode Zener se met à conduire dans le sens inverse, tout en gardant la tension constante.

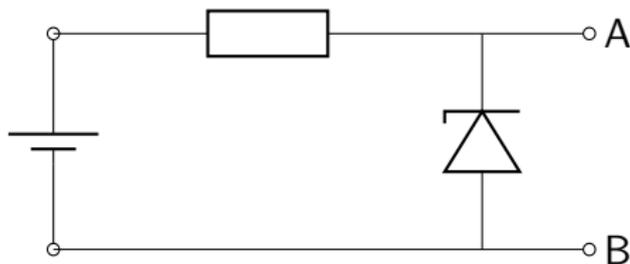


Figure 17.3 – Circuit régulateur de tension.

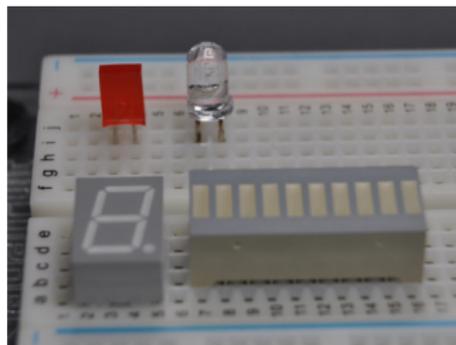
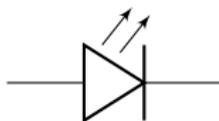
# Les diodes

## Les diodes électroluminescentes

En polarisation directe, une **diode électroluminescente (DEL)** s'illumine.

Elles possèdent les caractéristiques importantes suivantes :

- Tension de seuil ( $U_F$ ) ;
- Intensité de seuil ( $I_F$ ).



# Les diodes

## Les diodes électroluminescentes, Résistance de protection

Le calcul de la valeur et de la puissance de la résistance de protection se fait avec les équations 17.1 et 17.2.

$$R = \frac{U_s - U_f}{I_f} \quad (17.1)$$

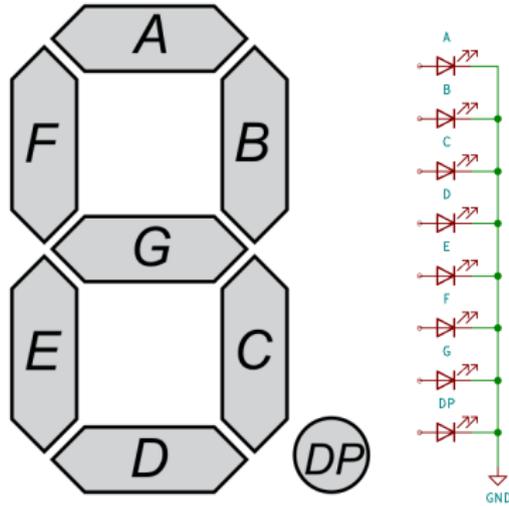
$$P = (U_s - U_f) \times I_f \quad (17.2)$$

Où :

- $U_s$  : La tension de la source d'alimentation ;
- $U_f$  : La tension *forward* de la DEL ;
- $I_f$  : Le courant *forward* de la DEL.

# Les diodes

Les diodes électroluminescentes, Afficheur sept segments



Disposition standard des segments DEL (concept et physique).

# Les diodes

## Exercices

Selon la fiche technique de la [DEL HLMP-K150](#)

- $V_F = 1,6 \text{ V}$
- $I_F = 1 \text{ mA}$

Calculer la résistance nécessaire pour une tension d'alimentation de

- 1 5 V
- 2 9 V
- 3 9,6 V

- 1 Les électrodes d'une diode à semi-conducteur s'appellent :
- 2 Pour qu'une diode conduise, elle doit être :
- 3 Quels segments sont nécessaires pour afficher la lettre « H » ?
- 4 Quels segments sont nécessaires pour afficher la lettre « L » ?

# Les diodes

## Exercices, Réponses

$$① R = \frac{5 - 1,6}{0,001} = 3400 \Rightarrow 3,2 \text{ k}\Omega$$

$$② R = \frac{9 - 1,8}{0,001} = 7200 \Rightarrow 7,2 \text{ k}\Omega$$

$$③ R = \frac{9,6 - 1,8}{0,001} = 7800 \Rightarrow 7,8 \text{ k}\Omega$$

① anode et cathode

② en polarisation directe

③ F,B,G,E,C

④ F,E,D

Composants requis :

- 1 x résistance 470  $\Omega$
- 1 x DEL

# Les diodes

Laboratoire, Schéma

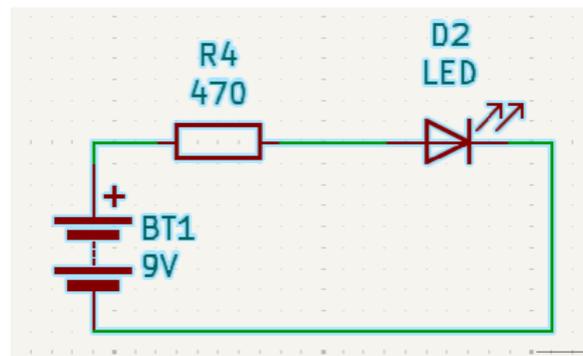


Figure 17.4 – Simple circuit à DEL

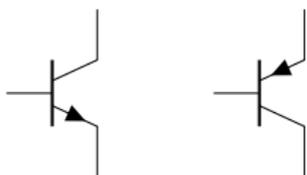
# Les transistors

Les transistors sont des composants à semi-conducteurs qui permettent le contrôle ou l'amplification de tensions et courants électriques.

# Les transistors

## Transistors bipolaires

Les transistors bipolaires sont formée de jonctions  $N-P-N$  ou  $P-N-P$ .



Symboles de transistor (Q) NPN et PNP.

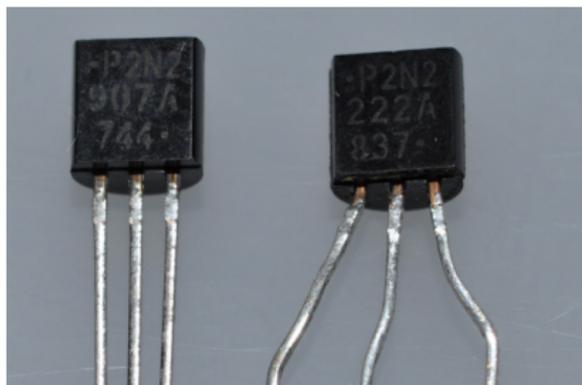


Figure 18.2 – Transistors.

# Les transistors

## Transistors bipolaires, Fonctionnement

Un transistor bipolaire est muni de 3 électrodes :

- Collecteur (C) : l'entrée du signal
- Base (B) : le contrôle du signal
- Émetteur (E) : la sortie du signal

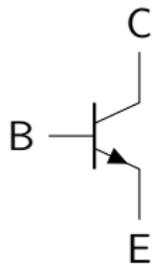


Figure 18.3 – Électrodes d'un transistor bipolaire.

# Les transistors

## Transistors bipolaires, Modes communs

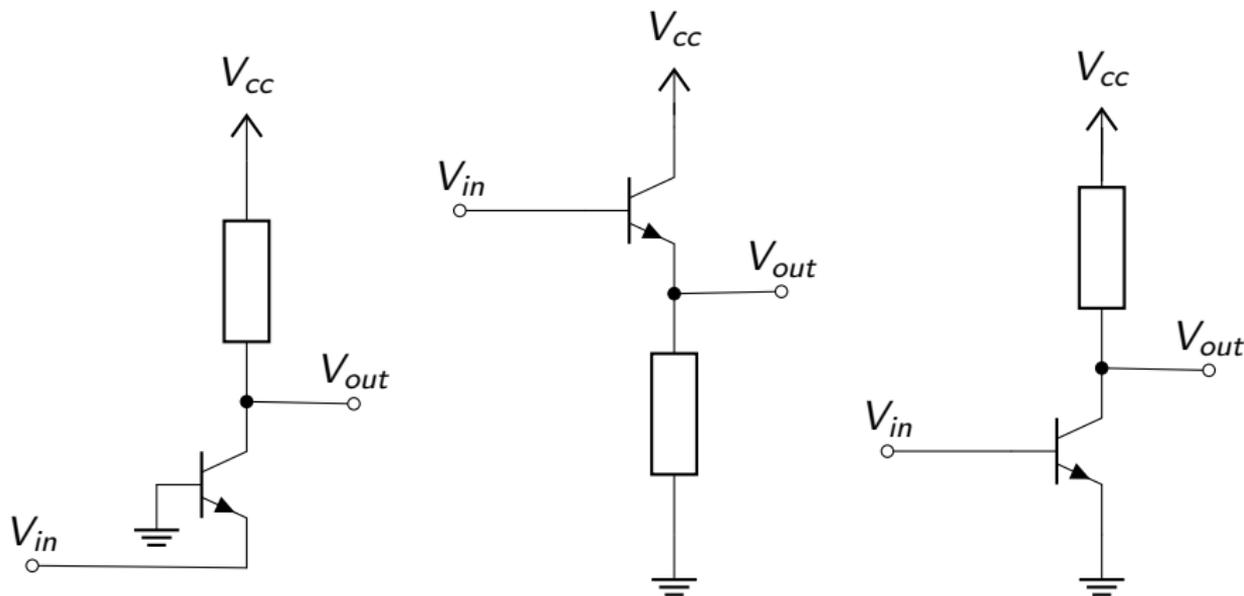


Figure 18.4 – Mode commun transistor PNP : base, collecteur, émetteur.

# Les transistors

## Transistors bipolaires, Amplification

Une légère augmentation du courant entre la base et l'émetteur en contrôle un plus grand entre l'émetteur et le collecteur.

Le gain en courant, bêta ( $\beta$ ) ou  $h_{FE}$ , est le rapport entre les courants circulant entre le collecteur et la base.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (18.1)$$

Où :

- $\beta$  : gain ;
- $I_C$  : intensité au collecteur ;
- $I_B$  : intensité à la base.

# Les transistors

## Transistors bipolaires, Interrupteur

Un transistor peut aussi être utilisé comme un interrupteur en *saturant*, ou non, la base.

Calcul du courant à la base selon le courant nécessaire au collecteur :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (18.2)$$

Calcul de la résistance la base :

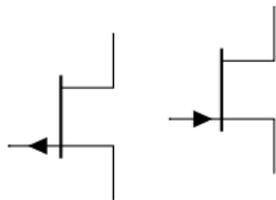
$$R_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_B} \quad (18.3)$$

# Les transistors

## Transistors à effet de champ

Transistors dans lequel le courant d'un canal est contrôlé par un champ électrique.

Le canal est soit de type  $N$  ou de type  $P$ .



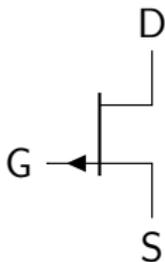
Symboles des transistors à effet de champ (Canal P, Canal N).

# Les transistors

## Transistors à effet de champ, Fonctionnement

Un transistor à effet de champ est muni de 3 électrodes :

- Drain : électrode où les porteurs de charge sortent du canal ;
- Porte (gate) : électrode commandant la conductance du canal, proportionnellement à la *tension* de polarisation ;
- Source : électrode où les porteurs de charge entrent dans le canal.



# Les transistors

## Transistors à effet de champ

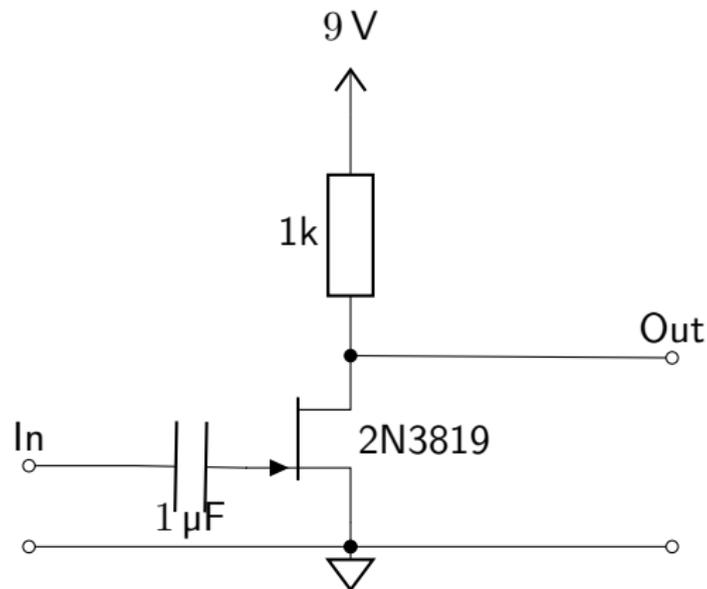


Figure 18.5 – Amplificateur FET non inversé.

# Les transistors

## Formats

Les transistors sont souvent dans un format physique nommé *TO* (*transistor outline*).

# Les transistors

## Formats, TO-18

- Boitier : Métallique ;
- Nombre de broches : 3 ;
- Espacement horizontal des broches : dans un cercle d'un diamètre de 0,1 po (2,54 mm).

# Les transistors

## Formats, TO-92

- Boitier : Plastique ou epoxy ;
- Nombre de broches : 3 ;
- Espacement horizontal des broches : 0,05 po (1,274 mm).

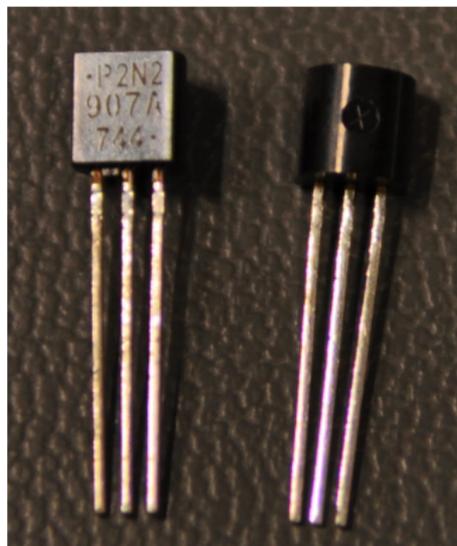


Figure 18.6 – TO-92 (avant et arrière).

# Les transistors

## Formats, TO-220

- Boitier : Céramique monté sur une plaque d'aluminium et muni d'un trou pour sa fixation à un radiateur (heatsink) optionnel ;
- Nombre de broches : 3 ;
- Espacement horizontal des broches : 0,1 po (2,54 mm).

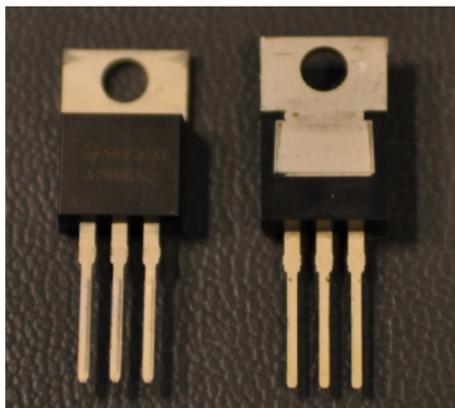


Figure 18.7 – TO-220 (avant et arrière).

# Les transistors

## Exercices

- Si l'on applique un signal faible à l'entrée d'un transistor et qu'un signal de niveau plus élevé apparaît à la sortie, comment se nomme cet effet ?
- Qu'est-ce qui empêche le remplacement d'un transistor PNP par un transistor NPN ?
- Quels sont les deux types fondamentaux de transistors bipolaires ?
- Dans un transistor à effet de champ, par quelle électrode les porteurs de charge entrent-ils dans le canal ?
- Dans un transistor à effet de champ, quelles deux électrodes sont raccordées aux extrémités du canal ?

# Les transistors

## Exercices, Réponses

- Amplification
- Les polarités sont inversées
- NPN et PNP
- La source
- La source et le drain

Construisons une veilleuse à transistor.

Composants requis :

- 1 x résistance 470  $\Omega$
- 1 x résistance 22 k $\Omega$
- 1 x photorésistance
- 1 x DEL
- 1 x transistor NPN (2N2222)

# Les transistors

Laboratoire, Schéma

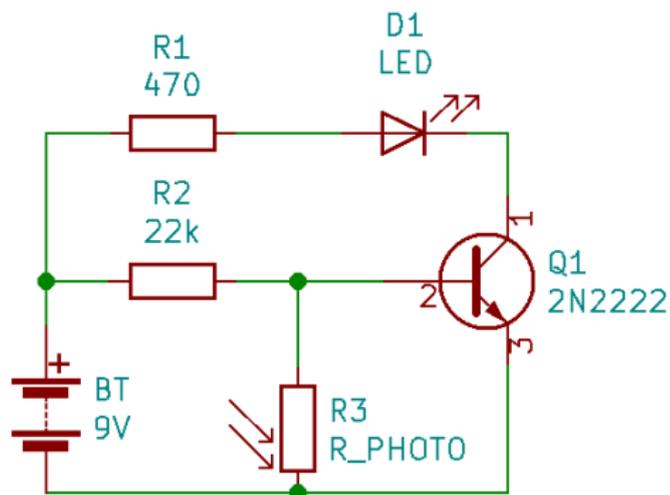


Figure 18.8 – Veilleuse électronique

# Le décibel

Le décibel (dB) sert à exprimer un rapport entre deux puissances, selon une échelle logarithmique calculé avec l'équation 19.1.

$$X_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (19.1)$$

Le décibel est souvent utilisé en télécommunication et en audio pour indiquer un gain ou une perte dans un signal.

Tableau 19.1 – Rapports des puissances et décibels

db	0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	16	20	30
Rapport	1	1,26	1,6	2	2,5	≈3,2	4	5	8	10	40	100	1000

# Le décibel

## Exercices

- Un gain de 2 d'un signal est exprimé comment en décibel ?

# Le décibel

## Exercices

① 3 dB

# Les circuits intégrés

Un **circuit intégré (CI)** est un ensemble de composants intégrés dans un même module, de plastique ou de céramique.

Un **CI** contient la plupart du temps des transistors, leurs nombres variant entre quelques dizaines et des millions.

Ils sont utilisés entre autres, comme :

- Amplificateurs opérationnels (op amp) ;
- Régulateur de tension ;
- Convertisseurs de niveau électrique ;
- Convertisseurs analogiques et digitaux ;
- Mémoires ;
- Processeurs.

# Les circuits intégrés

## Format DIP

Le format **Dual in-line package (DIP)** est un boîtier muni de broches sur deux cotés opposés.

- Boîtier : Plastique (PDIP) ou céramique (CDIP) ;
- Nombre de broches : variables (4, 8, 16, 28, 32) ;
- Espacement horizontal des broches : 0,1 po
- Espacement vertical des broches :
  - Mince (narrow) : 0,3 po
  - Large (wide) : 0,6 po

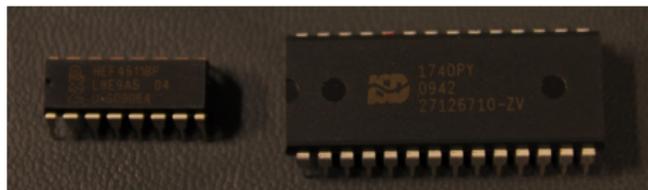


Figure 20.1 – DIP mince et large.

# Les circuits intégrés

## Photocoupleurs

Ce sont des **CI** comprenant une **DEL** et une photodiode ou un phototransistor.

Ils permettent d'isoler *électriquement* un signal **CC**.

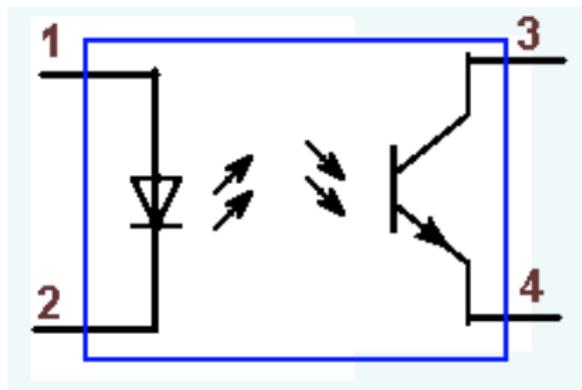


Figure 20.2 – Photocoupleur

# Les régulateurs de tension

Tout comme les diodes Zener, les régulateurs de tensions permettent d'obtenir une tension stable mais de façon plus précise et avec moins de perte de courant.

# Les régulateurs de tension

## Le régulateur 78xx

Famille de régulateurs de tension linéaire. Ils sont utilisés au lieu de diode Zener dans les circuits demandant plus de puissance.

Souvent dans un format [TO-220](#) :

- Input : Tension d'entrée
- Common : Tension commune
- Output : Tension de sortie

# Les régulateurs de tension

## Le régulateur 78xx, Caractéristiques

- Avantages

- Seulement un condensateur externe est requis comme composant supplémentaire ;
- Une protection de courant est intégrée au régulateur.

- Inconvénients :

- La tension d'entrée doit toujours être plus élevée que celle de sortie, typiquement de 2,5 V ;
- Le courant en entrée est le même qu'en sortie ce qui, dépendant de la différence des tension d'entrée et de sortie, peut nécessiter un radiateur (heatsink) pour dissiper la puissance perdue en chaleur.

# Les régulateurs de tension

## Le régulateur LM317

Régulateur de tension linéaire ajustable introduit par *National Semiconductor* (Texas Instruments).

Disponible en format [TO-220](#).

# Les régulateurs de tension

## Le régulateur LM317, Caractéristiques

Les trois broches ont les significations suivantes :

- Adjust : Signal d'ajustement ;
- Output : Tension de sortie ;
- Input : Tension d'entrée.

# Minuterie 555

## explications

Dans le contexte présent, une minuterie (*timer*) est un système de temporisation.

Il ne contient pas d'heure ou de date mais permet plutôt de garder un rythme.

Le *NE555* fut introduit en 1972 par *Signetics* (NXP).

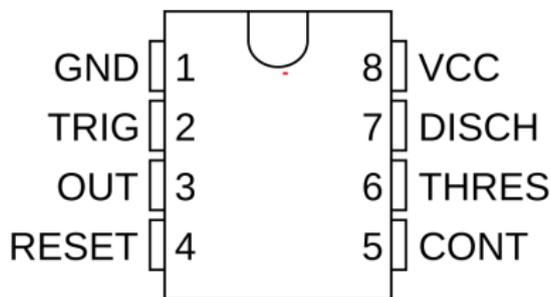


Figure 22.1 – 555 en format DIP

# Minuterie 555

## Caractéristiques

#	Nom	Description
1	GND	Masse
2	TRIG	Gâchette, amorce la temporisation ( $\leq \frac{1}{3} VCC$ )
3	OUT	Signal de sortie
4	RESET	Remise à zéro, interruption de la temporisation
5	CONT	Accès à la référence interne ( $\frac{2}{3} VCC$ )
6	THRES	Déclenche la fin de la temporisation, ( $> \frac{2}{3} VCC$ )
7	DISCH	Borne du condensateur de temporisation
8	VCC	Tension d'alimentation, généralement de 5 V à 15 V

# Minuterie 555

## Mode monostable

En mode *monostable* (*one-shot*), la sortie change d'état temporairement.

A développer

# Minuterie 555

Mode bistable

En mode *bistable* (*latch*), la sortie change d'état et maintient cet état.

A développer

# Minuterie 555

## Mode astable

En mode *astable*, la sortie change d'état continuellement.

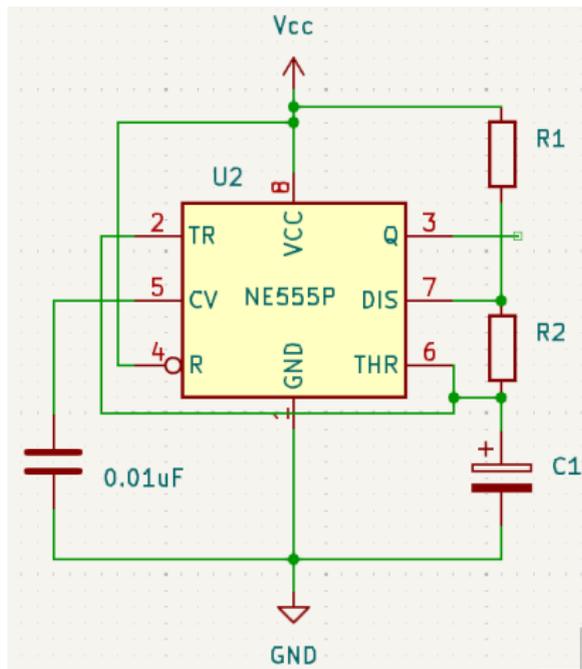


Figure 22.2 – 555 en mode astable.

# Minuterie 555

## Mode astable, Fonctionnement

En mode *astable*, la sortie change d'état continuellement.

Étapes :

- 1 Le courant de l'alimentation circule à travers les résistances  $R_1$  et  $R_2$ , chargeant le condensateur  $C_1$ .
- 2 Quand la tension dans le condensateur atteint  $2/3$  de  $V_{CC}$ , le 555 le détecte via la broche *THRES* et connecte à l'interne la broche *DISCH* à la masse.
- 3 Le condensateur  $C_1$  se décharge à travers la résistance  $R_2$  mais quand la tension restante atteint  $1/3$  de  $V_{CC}$ , la broche *TRIG* le détecte et débranche à l'interne la broche *DISCH* de la masse.
- 4 Le condensateur  $C_1$  se recharge et un nouveau cycle commence.

Nous allons construire un oscillateur qui permettra de générer des sons à différentes fréquences.

Composants requis :

- 1 x résistance  $10\ \Omega$
- 1 x résistance  $1\ \text{k}\Omega$
- 1 x potentiomètre  $1\ \text{M}\Omega$
- 1 x condensateur  $0,01\ \mu\text{F}$
- 1 x condensateur  $4,7\ \mu\text{F}$
- 1 x haut-parleur
- 1 x 555

# Minuterie 555

Laboratoire, Schéma

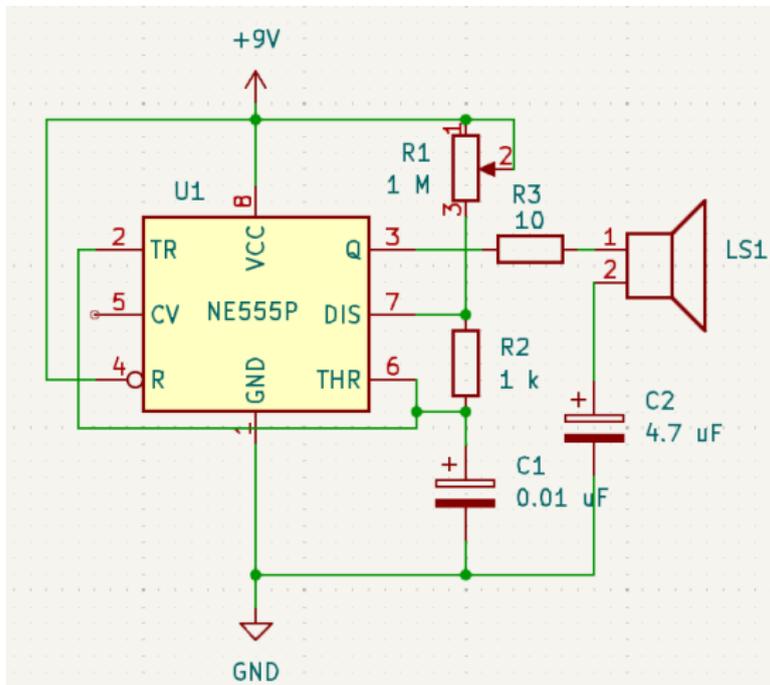
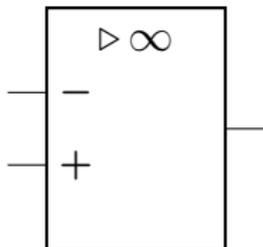


Figure 22.3 – Oscillateur

# Les amplificateurs opérationnels

Un amplificateur opérationnel (*op-amp*) est un amplificateur *différentiel* à grand gain.

Il est composé de plusieurs transistors, la plupart du temps réunis dans un circuit intégré.



Symbole d'un amplificateur opérationnel.

# Les amplificateurs opérationnels

LM386

Le *LM-386* est un amplificateur audio basse tension introduit dans les années 1970 par *National Semiconductor* (Texas Instruments).

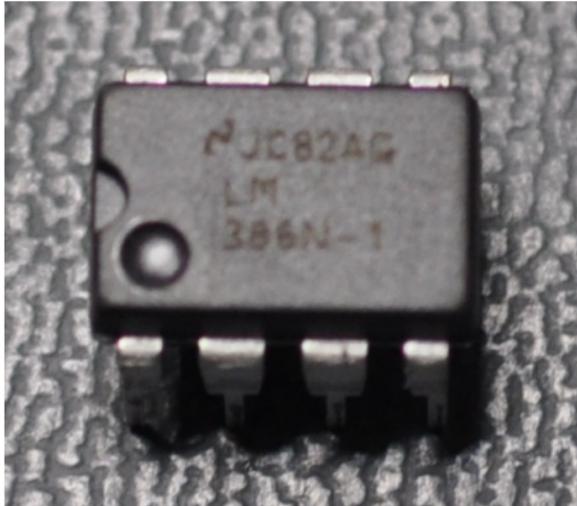


Figure 23.1 – LM-386 en format DIP.

# Les amplificateurs opérationnels

## LM386, Caractéristiques

Nom	#	Type	Description
Gain	1	-	
-INPUT	2	I	Entrée inversée
+INPUT	3	I	Entrée non inversée
GND	4	P	Masse
$V_{OUT}$	5	O	Sortie
$V_S$	6	P	Tension d'alimentation
BYPASS	7	O	
GAIN	8	-	

Tableau 23.1 – LM-386 : (I)nput, (O)output, (P)ower.

Le gain par défaut est de 20.

La tension d'entrée du signal devrait varier de  $-0,4\text{V}$  à  $0,4\text{V}$ .

Selon le modèle, la tension d'alimentation *recommandée* est de  $4\text{V}$  à  $18\text{V}$ .

# Les amplificateurs opérationnels

## Laboratoire

Nous allons construire un petit amplificateur, dans sa version de base.

Composants requis :

- 1 x résistance  $10\ \Omega$
- 1 x potentiomètre  $10\ \text{k}\Omega$
- 1 x condensateur  $0,05\ \mu\text{F}$
- 1 x condensateur  $250\ \mu\text{F}$
- 1 x haut-parleur
- 1 x LM386

Le potentiomètre *RV1* sert à limiter le niveau sonore en entrée. Le condensateur *C1* bloque tout signal **CC** qui pourrait être présent.

# Les amplificateurs opérationnels

Laboratoire, Schéma

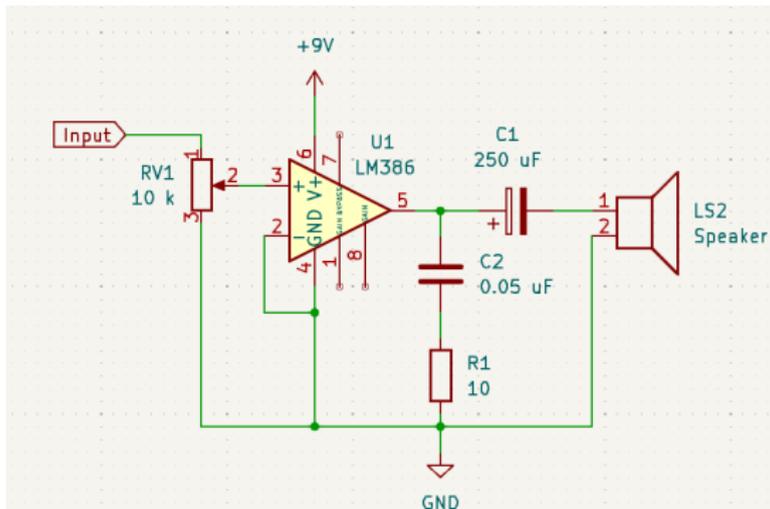


Figure 23.2 – LM386 gain de 20

# Les blocs d'alimentation

Un bloc d'alimentation transforme une source **CA** résidentiel en une source **CC**, souvent de moins de 30 V.

Ils doivent souvent fournir un courant important.

# Les blocs d'alimentation

## Fonctionnement

Les sections suivantes sont habituellement présentes :

- Transformateur ;
- Pont rectification ;
- Condensateur d'entrée ;
- Régulateur ;
- Condensateur de sortie.

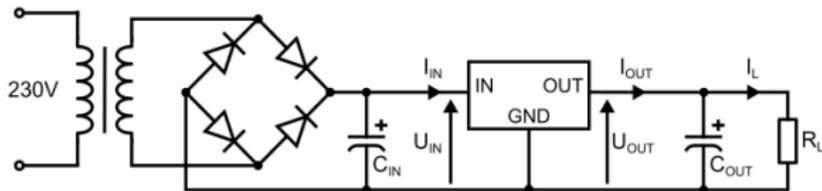


Figure 24.1 – Circuit interne d'un bloc d'alimentation.

# Les blocs d'alimentation

## Usages

L'utilisation de fils de calibres appropriés est nécessaire pour éviter les pertes de tension.

Un bloc d'alimentation défectueux, de mauvaise qualité ou mal branché, peut parfois engendré un ronflement qui se traduit par un « hum » dans un circuit audio.

# Les circuits logiques

Ce sont les **CI** utilisés dans les circuits numériques, fonctionnant de façon binaire (logique booléenne).

Il sont habituellement en format **DIP** de 16 broches

# Les circuits logiques

Usages, 74xx

Famille de **CI** TTL (*Transistor–transistor logic*).

Leurs tensions est habituellement de 3,3 V et 5 V.

# Les circuits logiques

Usages, 4000

Famille de CI CMOS (*Complementary metal–oxide–semiconductor*).

Leurs plages de tension sont beaucoup plus flexibles que les CI TTL.

# Le multimètre

Un multimètre comprend au minimum les fonctions suivantes :

- Ampèremètre ;
- Voltmètre ;
- Ohmmètre.



Figure 26.1 – Différents multimètres (analogue et numérique).

# Le multimètre

## Types

Il existe deux grands types de multimètre :

- Analogue : cadran gradué et aiguille ;
- Numérique : écran **affichage à cristaux liquides (ACL)**.

# Le multimètre

## Éléments

Nous allons maintenant voir les principaux éléments d'un multimètre.

# Le multimètre

## Éléments, Sélecteur et fonctions

Les différentes fonctions sont accessibles via un sélecteur et parfois quelques boutons.



Figure 26.2 – Sélecteur de fonctions d'un multimètre.

# Le multimètre

## Éléments, Sondes

Le multimètre est raccordé au circuit (ou composant) à mesurer à l'aide de fils toronnés, identifiés par les couleurs rouge et noire.

Une des extrémités, très pointue, sert de sonde dans le circuit.



Figure 26.3 – Sondes d'un multimètre.

# Le multimètre

## Éléments, Bornes

L'autre extrémité du fil d'essai est branchée au multimètre, de façon permanente ou via une fiche de type « banane » de 4 mm.

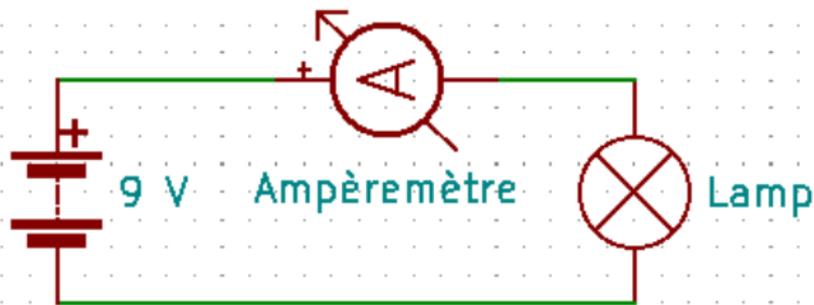


Figure 26.4 – Bornes d'un multimètre.

# Le multimètre

## Ampèremètre

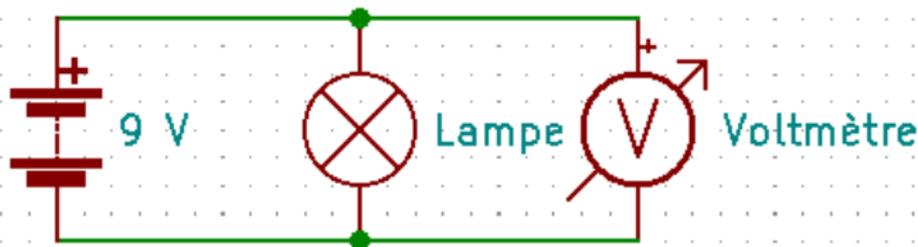
- 1 Brancher le fil d'essai noir dans le connecteur « commun »
- 2 Brancher le fil d'essai rouge sur la borne de la fonction « A » de la bonne plage de valeur
- 3 Sélectionner la plage de lecture adéquate pour la fonction « A »
- 4 Insérer les sondes en **série** dans le circuit, tout en respectant la polarité



# Le multimètre

## Voltmètre

- 1 Brancher le fil d'essai noir dans le connecteur « commun »
- 2 Brancher le fil d'essai rouge sur la borne de la fonction « V » pour la plage voulue
- 3 Sélectionner la plage de lecture adéquate de la fonction « V »
- 4 Insérer les sondes en **parallèle** aux bornes de la tension à mesurer, tout en respectant la polarité



# Le multimètre

## Ohmmètre

- 1 Isoler le composant à mesurée du reste du circuit.
- 2 Brancher le fil d'essai noir dans le connecteur « commun »
- 3 Brancher le fil d'essai rouge sur la borne de la fonction «  $\Omega$  »
- 4 Sélectionner la plage de lecture adéquate pour la fonction «  $\Omega$  »
- 5 Placer les sondes aux bornes du composant

