



# Synthèse Latex

Exemples et références

Nicolas Le Guerroué

1<sup>er</sup> mars 2021  
73 pages

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Généralités . . . . .	4
1.2	Conventions . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Modélisation de l'AOP</b>	<b>6</b>
2.1	Modèle théorique . . . . .	6
2.2	Modèle réel . . . . .	6
2.3	Modes de fonctionnement . . . . .	7
2.3.1	Montages linéaires . . . . .	7
2.3.2	Montages comparateurs . . . . .	7
2.4	Résistance de charge . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Étude en mode linéaire</b>	<b>9</b>
3.1	Intérêt de l'étude . . . . .	9
3.2	Méthode de résolution . . . . .	9
<b>I</b>	<b>Montages</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Montage suiveur</b>	<b>11</b>
4.1	Présentation . . . . .	11
4.2	Montage . . . . .	11
4.3	Démonstration . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Montage non-inverseur</b>	<b>14</b>
5.1	Présentation . . . . .	14
5.2	Montage . . . . .	14
5.3	Démonstration . . . . .	14
5.3.1	Exemple . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Montage inverseur</b>	<b>16</b>
6.1	Présentation . . . . .	16
6.2	Montage . . . . .	16
6.3	Démonstration . . . . .	16
6.4	Application . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Montages comparateurs</b>	<b>18</b>
7.1	Présentation . . . . .	18
7.1.1	Comparateur non inverseur simple seuil . . . . .	18
7.1.2	Comparateur inverseur simple seuil . . . . .	19
7.1.3	Comparateur non inverseur double seuil . . . . .	19
7.1.4	Comparateur inverseur double seuil . . . . .	23

<b>8 Montage intégrateur</b>	<b>25</b>
8.1 Présentation . . . . .	25
8.2 Montage . . . . .	25
8.3 Démonstration . . . . .	25
8.4 Application . . . . .	26
<b>9 Montage soustracteur</b>	<b>27</b>
9.1 Présentation . . . . .	27
9.2 Montage . . . . .	27
9.3 Démonstration . . . . .	27
9.4 Application . . . . .	28
<b>10 Montage sommateur</b>	<b>30</b>
10.1 Présentation . . . . .	30
10.2 Montage . . . . .	30
10.3 Démonstration . . . . .	30
<b>11 Introduction</b>	<b>31</b>
<b>12 Histoire</b>	<b>32</b>
<b>13 Principe de fonctionnement</b>	<b>33</b>
<b>14 Les différentes technologies</b>	<b>35</b>
14.1 Les condensateurs à film . . . . .	35
14.2 Les condensateurs à céramique . . . . .	37
14.3 Les condensateurs électrolytiques . . . . .	38
14.4 Les condensateurs variables . . . . .	38
<b>15 Domaines d'application</b>	<b>40</b>
15.1 Les condensateurs de filtrage . . . . .	40
15.2 Les condensateurs de découplage . . . . .	41
15.3 Les condensateurs de liaison . . . . .	44
<b>16 Avenir du condensateur</b>	<b>48</b>
16.1 Les supercondensateurs . . . . .	48
<b>17 Introduction</b>	<b>49</b>
<b>18 Les transistors bipolaires</b>	<b>50</b>
18.1 Présentation . . . . .	50
18.2 Conventions . . . . .	50
18.2.1 Les familles de transistors bipolaires . . . . .	50
18.3 Les paramètres de sélection du transistor . . . . .	51
18.4 Le principe . . . . .	51
18.5 Exemple . . . . .	53
18.6 Mise en pratique . . . . .	53

18.6.1	Branchements . . . . .	53
18.6.2	Dimensionnement de la résistance . . . . .	54
18.6.3	Exemple de programme Arduino . . . . .	55
<b>19</b>	<b>Les transistors MOSFET</b>	<b>56</b>
19.1	Présentation . . . . .	56
19.2	Conventions . . . . .	56
19.2.1	Les familles de transistors MOSFET . . . . .	57
19.3	Les paramètres de sélection du transistor . . . . .	57
19.4	Le principe . . . . .	57
19.5	Comparaison avec les transistors bipolaires . . . . .	58
19.6	Mise en pratique . . . . .	58
19.6.1	Branchements . . . . .	58
19.6.2	Exemple de programme Arduino . . . . .	59
<b>20</b>	<b>Conclusion</b>	<b>61</b>
20.1	Ce qu'il faut retenir . . . . .	61
20.2	Les fiches techniques . . . . .	61
<b>21</b>	<b>Les familles des circuits logiques</b>	<b>63</b>
21.1	Présentation . . . . .	63
21.1.1	Principe TTL . . . . .	63
21.1.2	Principe CMOS . . . . .	63
21.2	Comment les distinguer ? . . . . .	63
21.3	Avantages et inconvénients . . . . .	63
<b>22</b>	<b>Les signaux</b>	<b>65</b>
22.1	Introduction . . . . .	65
22.1.1	Les grandeurs physiques . . . . .	65
22.1.2	Les atomes . . . . .	65
22.1.3	La charge électrique . . . . .	65
22.1.4	Les électrons . . . . .	65
22.2	La tension électrique . . . . .	65
22.3	Analogie . . . . .	65
22.3.1	Exemples . . . . .	66
22.4	Introduction . . . . .	66
22.5	L'objectif . . . . .	66
22.6	Le choix du transformateur . . . . .	68
22.7	Le pont redresseur de tension . . . . .	69
22.7.1	Principe . . . . .	69
22.7.2	Un exemple de boîtier . . . . .	70
22.8	Les condensateurs . . . . .	70
22.8.1	Principe . . . . .	71
22.8.2	Choix de la valeur . . . . .	71
22.9	Les Régulateurs de tension . . . . .	71

22.9.1	Principe et branchements . . . . .	71
22.9.2	Les familles des régulateurs . . . . .	72
22.9.3	Un exemple . . . . .	72
.1	Quelques fournisseurs de composants et matériels . . . . .	73

- ▶ Document réalisé en  $\text{\LaTeX}$  par Nicolas Le Guerroué pour le Club de Robotique et d'Electronique Programmable de Ploemeur (CREPP)
- ▶ Permission vous est donnée de copier, distribuer et/ou modifier ce document sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.
- ▶ Version du 1<sup>er</sup> mars 2021
- ☎ 06.20.88.75.12
- ✉ [nicolasleguerroue@gmail.com](mailto:nicolasleguerroue@gmail.com)

## Généralités

Un AOP (Amplificateur Opérationnel) est un composant actif qui permet de réaliser des opérations mathématiques (addition, soustraction, intégration, dérivation, etc) et du fait de sa miniaturisation et de sa fiabilité, on le rencontre aujourd'hui dans de nombreuses applications comme l'audio, la radio, l'asservissement...

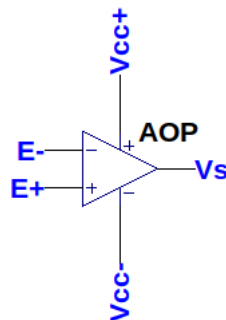


FIGURE 1.1 – Les entrées et sorties de l'AOP

Un AOP possède deux entrées notées appelées **entrée non inverseuse** et **entrée inverseuse**, une **sortie** et deux broches d'**alimentation**. L'AOP dispose souvent d'une alimentation symétrique ( $V_{cc+}$  et  $V_{cc-}$ ) avec comme référence de tension le point milieu (GND) des alimentations.

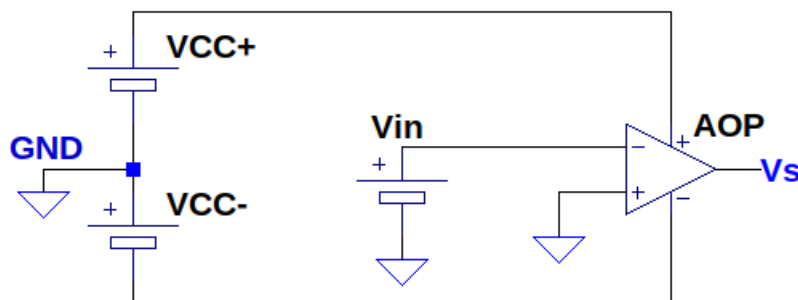


FIGURE 1.2 – L'alimentation d'un AOP

## Conventions

Afin de simplifier les calculs sur les AOP, quelques conventions ont été adoptées :

- La tension de sortie de l'AOP est notée  $V_s$

- La tension sur l'entrée inverseuse est appelée  $E_-$
- La tension sur l'entrée non inverseuse est appelée  $E_+$
- La tension différentielle ( $E + -E-$ ) est appelée  $\varepsilon$
- Le gain d'amplification différentiel de l'AOP est appelé  $A_d$  Ce gain est variable entre différentes familles d'AOP mais reste constant dans le temps
- Le gain d'amplification du montage est appelé  $A_0$  et varie en fonction des différents montages possibles

#### Remarque

L'alimentation des montages suivants ne sera pas représenté par souci de clarté.



## Modèle théorique

Dans un souci de simplification des calculs, un AOP peut être vu physiquement comme un composant ayant des caractéristiques parfaites. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- impédance d'entrée :  $Z \rightarrow +\infty\Omega$
- Impédance de sortie :  $Z = 0\Omega$
- $Ad \rightarrow +\infty$
- $V_{smax} = V_{cc+}$
- $V_{smin} = V_{cc-}$
- Bande passante :  $F_{max} \rightarrow +\infty$

Cela se traduit par un modèle dont les deux entrées sont ouvertes (courant nul) et avec une tension de sortie qui ne serait pas affectée par le courant de sortie

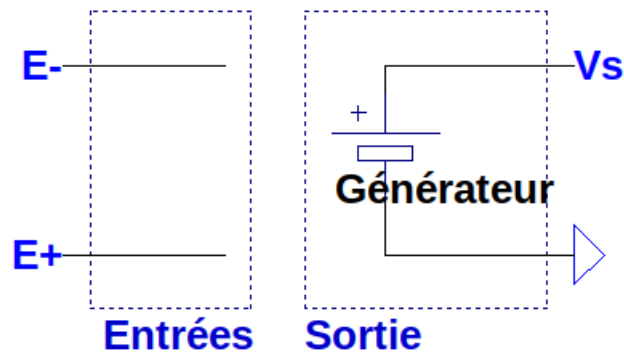


FIGURE 2.1 – Le modèle théorique de l'AOP

## Modèle réel

Cependant, il convient de noter que ce modèle n'est que théorique.

Du fait de la nature des composants constituant les AOP (transistors, condensateurs), la tension de sortie ne peut pas être égale à la tension d'alimentation.

Cette tension de sortie max est appelée  $V_{sat+}$  et  $V_{sat-}$

D'où le modèle suivant :

- impédance d'entrée :  $Z > 10^5 \Omega$
- Impédance de sortie :  $Z > 0 \Omega$  (courant de sortie max  $20mA$ )
- $Ad \gg 1000$
- $V_{s_{max}} = V_{cc_{sat+}}$
- $V_{s_{min}} = V_{cc_{sat-}}$
- Bande passante : imposée par le constructeur (Ex : le LM324 tolère 1MHz)

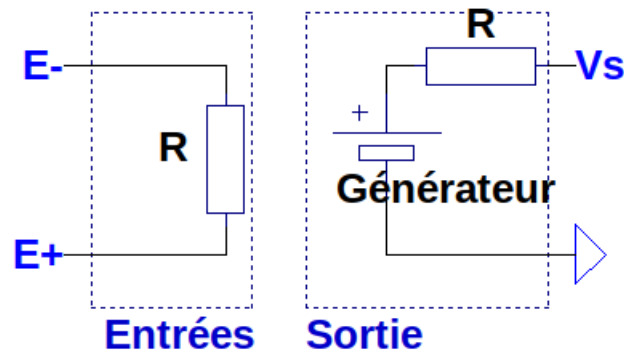


FIGURE 2.2 – Le modèle réel de l'AOP

Cependant, pour les calculs, l'hypothèse du courant d'entrée nul sera retenue, tout comme celle du gain  $Ad$

## Modes de fonctionnement

### Montages linéaires

Le signal  $V_s$  est une fonction mathématique du signal d'entrée  $V_e$ .

Dans certains cas, le signal de sortie conserve la forme du signal d'entrée sous couvert que l'AOP ne rentre pas en saturation.

Un montage linéaire impose un  $\varepsilon$  nul, sauf si l'AOP est saturé, c'est à dire si  $V_s = V_{sat}$

### Montages comparateurs

Le signal de sortie ne peut prendre que deux valeurs,  $V_{sat+}$  ou  $V_{sat-}$ . En l'absence de contre-réaction,  $V_s = \varepsilon Ad$

Une réaction est un retour du signal sur une des deux entrées. Celle ci peut être positive ou négative en fonction de l'entrée choisie (entrée -, réaction négative et entrée +, réaction positive).

Type de réaction	Positive	Négative	Aucune
Mode de fonctionnement	Comparateur	<b>Linéaire</b>	Comparateur

FIGURE 2.3 – Les modes de fonctionnement de l'AOP

## Résistance de charge

Il est possible de mettre une résistance de charge entre  $V_s$  et la masse.

Cette résistance symbolise un circuit relié directement à l'AOP.

Cependant, le courant de l'AOP étant limité à quelques dizaines de mA, il convient de prendre une résistance de charge  $R_c$  suffisamment grande ( $R_c > 1000\omega$ ).

Si  $R_c$  est suffisamment élevée, cette dernière n'influence pas la tension de sortie  $V_s$ .

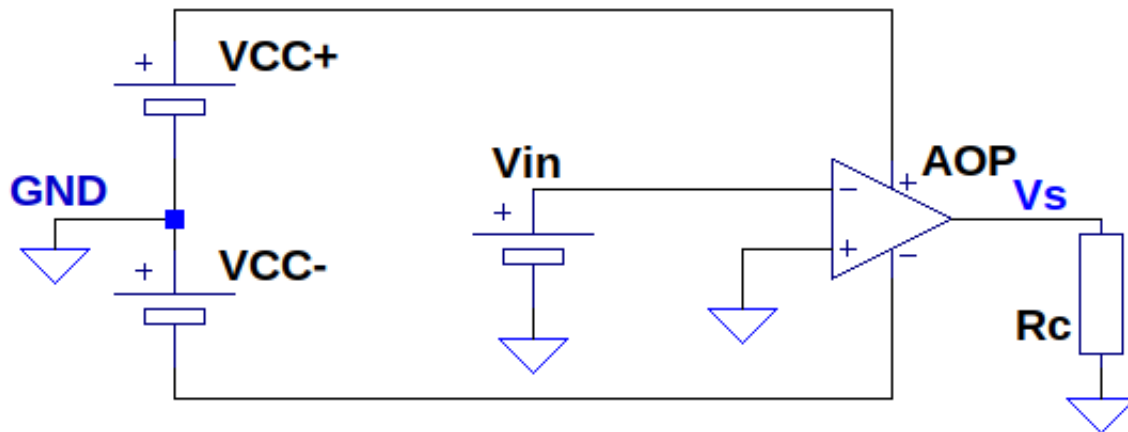


FIGURE 2.4 – La résistance de charge

## Intérêt de l'étude

Les AOP en fonctionnement linéaire permettent de réaliser les opérations mathématiques :

- **amplification** :  $V_s = A_0 \cdot V_e$   $A_0$  est le coefficient d'amplification du montage (A ne pas confondre avec  $A_d$  le coefficient d'amplification différentiel imposé par le constructeur)  $A_0$  peut être positif ou négatif
- **addition algébrique** :  $V_s = \sum_{k=0}^n V_k$
- **intégration et dérivation** (avec des condensateurs) à une constante près
- **logarithme et exponentielle**

## Méthode de résolution

La **réaction négative** (liaison entre la sortie et l'entrée inverseuse) impose un fonctionnement stable et linéaire, d'où  $\varepsilon = 0$ ,  $E_+ = E_-$

L'hypothèse de la résistance d'entrée de l'AOP implique que  $I_+ = I_- = 0$

Afin de déterminer  $V_s$ , il faut exprimer  $E_+$  et  $E_-$  en fonction des éléments du montage.

En égalisant les deux équations obtenues ( $E_+ = k$  et  $E_- = k'$ ), on obtient une relation de type  $V_s = f(V_e)$

### Remarque

$I_s$  est issu d'une source de tension, il n'y a donc pas de loi simple permettant de déterminer sa valeur algébrique. Il ne faut pas avoir d'a priori sur son sens

# Première partie

## Montages

## Présentation

Ce montage permet de reproduire à l'identique une tension d'entrée. L'intérêt de ce montage réside dans le fait que l'impédance d'entrée de l'AOP est considérée comme infinie et que son impédance de sortie est considérée comme nulle.

Ainsi, le comportement de la charge en entrée ne sera pas affecté par l'AOP, le signal d'entrée ne sera donc pas modifié.

Ce montage sert donc à faire une **adaptation d'impédance**.

## Montage

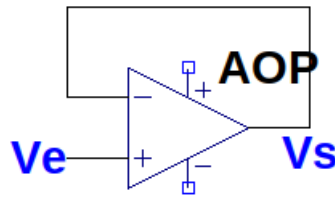


FIGURE 4.1 – Le montage suiveur

## Démonstration

La réaction négative implique que  $\varepsilon = 0$  (fonctionnement linéaire)

$$E_+ = V_e$$

$$E_- = V_s$$

$$\Rightarrow V_e = V_s$$

car  $E_+ = E_-$

**Exemple 1.** *On souhaite mesurer une tension au borne d'un capteur avec un appareil de mesure.*

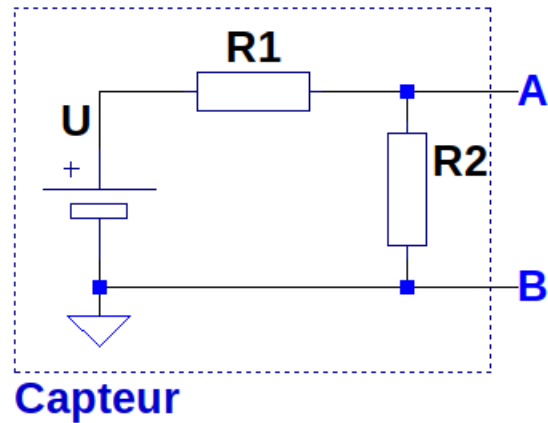


FIGURE 4.2 – Le capteur

On place ensuite une charge  $R_c$  au bornes de A et b. Cette résistance  $R_c$  représente l'appareil d'acquisition.

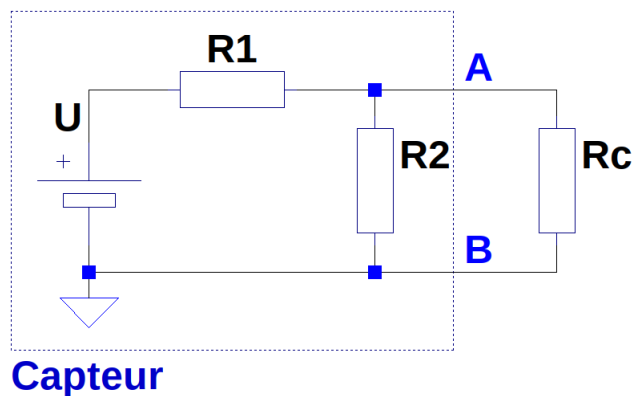


FIGURE 4.3 – Le modèle d'acquisition

**Question 1.** Quelle est l'influence de  $R_c$  sur  $U_{AB}$  dans le montage suivant ?

>>> 1. Sans la charge  $R_c$  :

$$U_{AB} = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Avec la charge  $R_c$  :

$$U_{AB} = \frac{U \cdot R_{equ}}{R_1 + R_{equ}}$$

Avec  $R_{equ}$  la résistance équivalente entre  $R_2$  et  $R_c$

$$\text{Si } R_c \rightarrow +\infty \text{ alors } R_{equ} \rightarrow \frac{U_{AB} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Si } R_c \rightarrow +0 \text{ alors } R_{equ} \rightarrow 0 \Rightarrow U_{AB} \rightarrow 0$$

D'où le montage suivant, avec  $R_c \rightarrow +\infty$ , le signal n'est pas déformé.

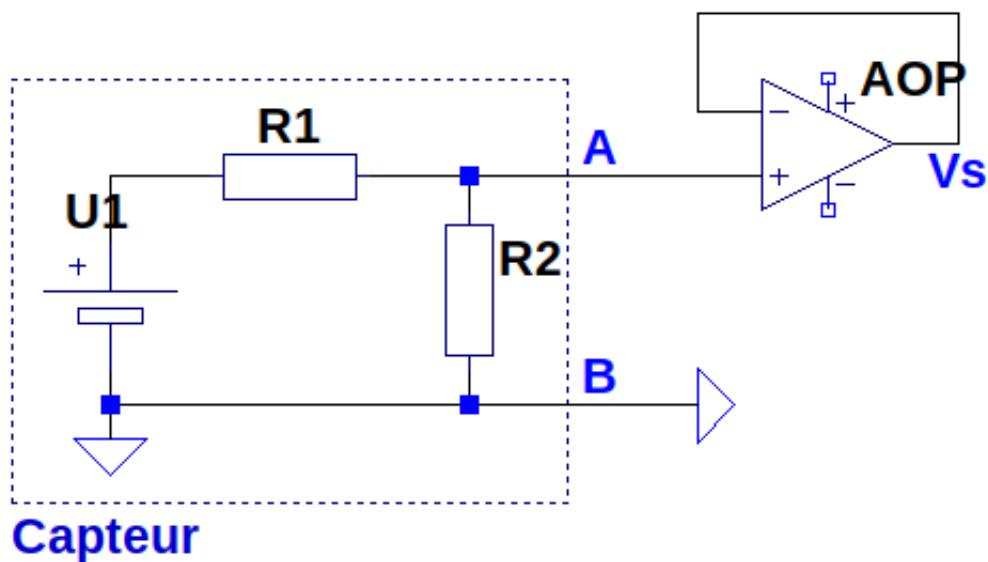


FIGURE 4.4 – L'adaptation d'impédance



## Présentation

Ce montage amplifie la tension  $V_e$  par un **gain**  $A_0$  **positif**.  
L'amplificateur reste en mode linéaire si  $V_e < V_{ccsat} \cdot A_0$

## Montage

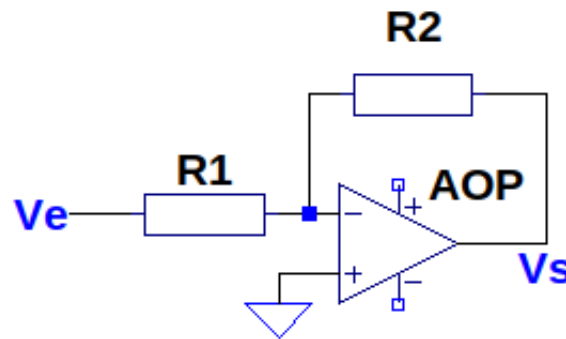


FIGURE 5.1 – Le montage amplificateur non inverseur

## Démonstration

Un AOP en mode linéaire impose  $\varepsilon = 0$  D'où  $E_+ = E_-$

$$E_+ = V_e$$

$$E_- = V_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$E_+ = E_- \Rightarrow V_e = V_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.1)$$

$$\Rightarrow \frac{V_e}{V_s} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow V_s = V_e \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

## Exemple

**Exemple 2.** *On souhaite amplifier un signal sinusoïdal par un coefficient  $k = 5$ .*

*On peut donc utiliser le montage précédent.*

*On prendra  $R_1 = 1k\Omega$  et  $R_2 = 4k\Omega$  pour avoir  $A_0 = 5$*

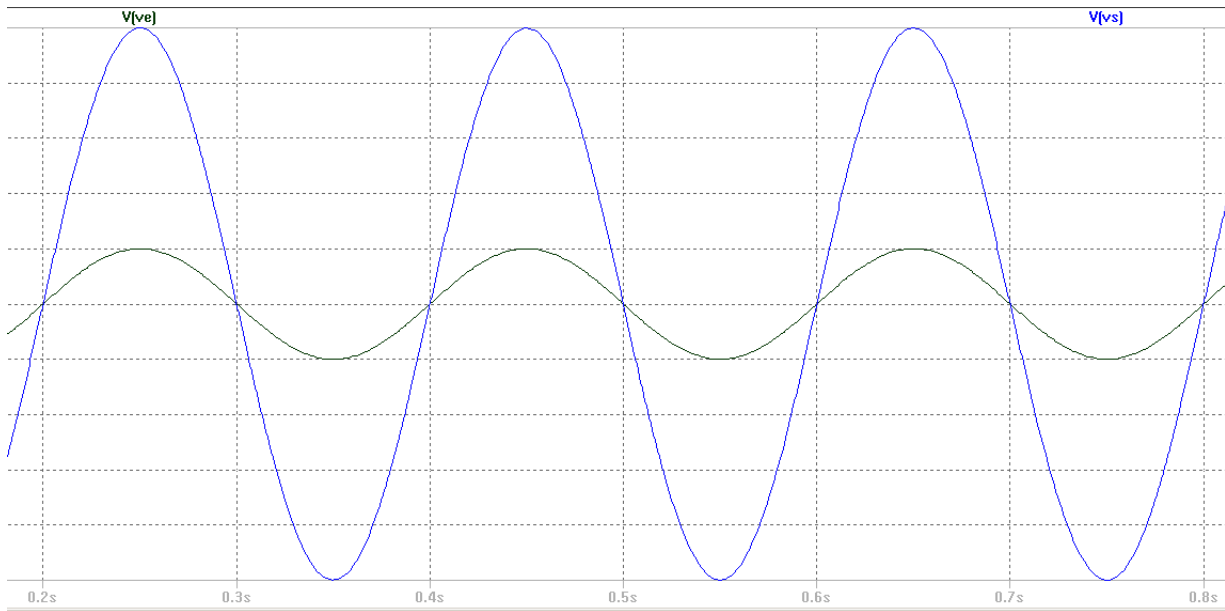


FIGURE 5.2 – Amplification du signal noir par 5

## Présentation

Ce montage amplifie la tension  $V_e$  par un **gain**  $A_0$  **négatif**.

## Montage

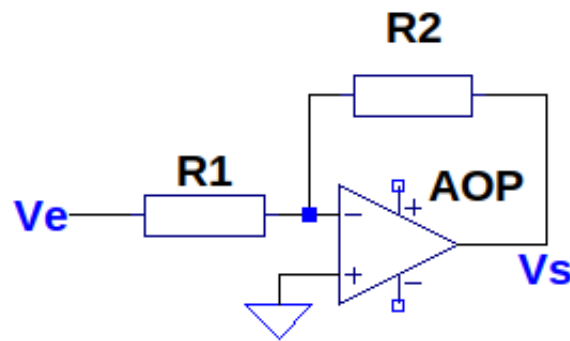


FIGURE 6.1 – Le montage amplificateur non inverseur

## Démonstration

Mode linéaire :  $\varepsilon = 0$

$$E_+ = 0 \quad (6.1)$$

$$E_- = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (6.2)$$

$$E_- = \frac{V_e \cdot R_2 + V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.3)$$

$$\Rightarrow \frac{V_e}{V_s} = -\frac{R_1}{R_2} \quad (6.4)$$

$$\Rightarrow V_s = -V_e \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (6.5)$$

Avec  $A_0 = -\frac{R_2}{R_1}$

## Application

**Exemple 3.** *On souhaite amplifier un signal sinusoïdal par un coefficient  $k = -5$ .  
On peut donc utiliser le montage précédent.  
On prendra  $R_1 = 1k\Omega$  et  $R_2 = 5k\Omega$  pour avoir  $A_0 = -5$*

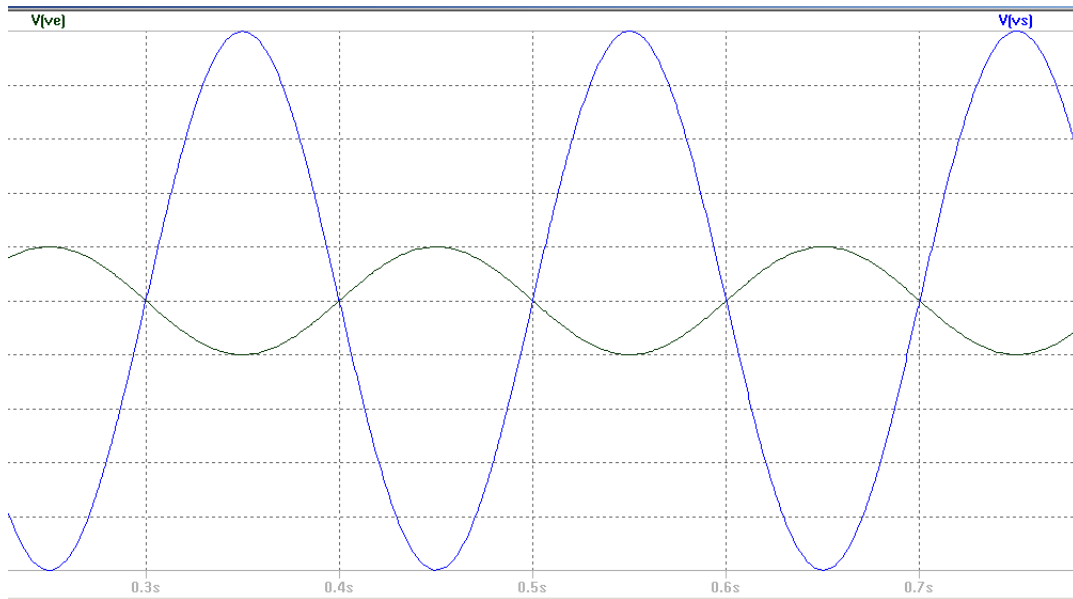


FIGURE 6.2 – Amplification du signal noir par -5

## Présentation

Un montage comparateur se reconnaît par son branchement :

- **Aucune contre réaction** n'est présente
- Une **contre réaction a lieu sur l'entrée non inverseuse** via un dipôle passif

Le montage comparateur permet de comparer deux tensions entre elles. Cependant, cette comparaison peut s'effectuer de plusieurs manières, avec un ou deux seuils, de manière inversée ou non...

## Comparateur non inverseur simple seuil

### Présentation

Ce montage permet de comparer simplement deux tensions entre elle.

### Montage

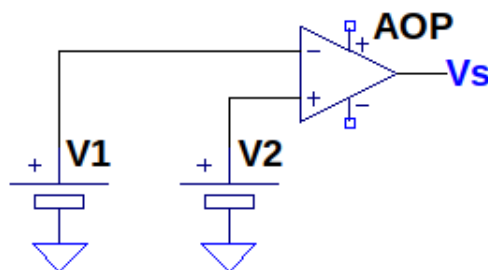


FIGURE 7.1 – Comparateur simple seuil

Ce mode est le plus simple et est régi de la manière suivante :

On sait que  $\varepsilon = E_+ - E_-$  et que  $V_s = \varepsilon \cdot A_d$  avec  $A_d = +\infty$   
(Circuit en boucle ouverte)

Si  $E_+ > E_-$  :

$$V_s = V_{sat+}$$

si  $E_+ < E_-$  :

$$V_s = V_{sat-}$$

Si  $V_2 = 0V$ , on obtient la caractéristique de transfert suivante

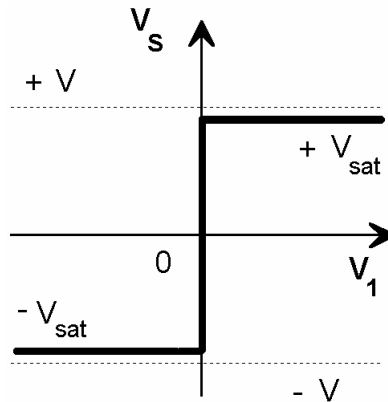


FIGURE 7.2 – Caractéristique de transfert,  $V_1$  est la tension d'entrée de l'AOP

## Comparateur inverseur simple seuil

Le raisonnement est le même sauf que les entrées sont inversées. De ce fait, le seuil de basculement se fait dans l'autre sens.

Si  $E_+ > E_-$  :

$$V_s = V_{sat-}$$

Si  $E_+ < E_-$  :

$$V_s = V_{sat+}$$

## Comparateur non inverseur double seuil

### Présentation

Ce type de montage permet d'éliminer les tensions "parasites", c'est à dire les tensions bruitées et non indésirables.

## Montage

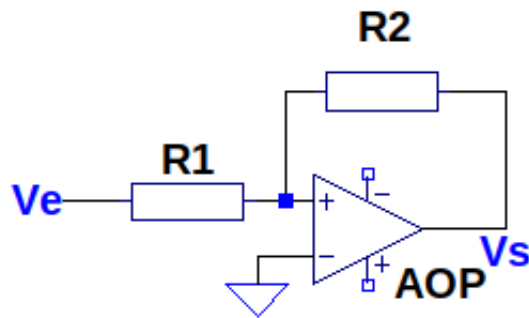


FIGURE 7.3 – Montage comparateur non inverseur double seuil

## Application

Par exemple, un capteur de lumière résistif (photo-résistance) sera sensible aux variations de lumière (nuages...).

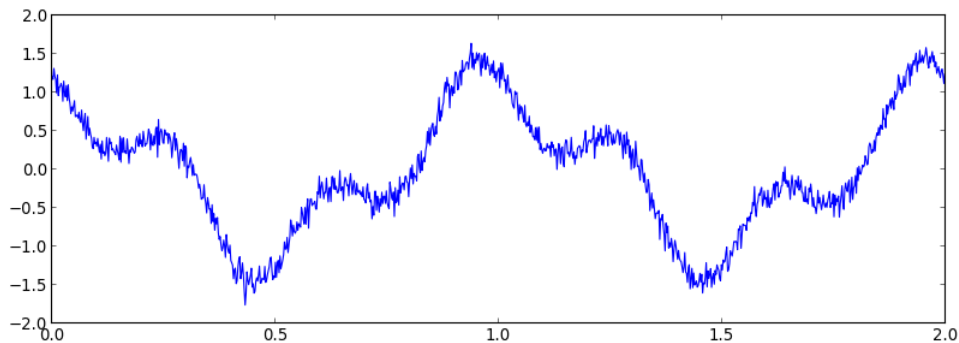


FIGURE 7.4 – Un signal bruité

Or, si on compare ce signal par rapport à une référence, on ne veut pas que le capteur déclenche plusieurs fois l'action.

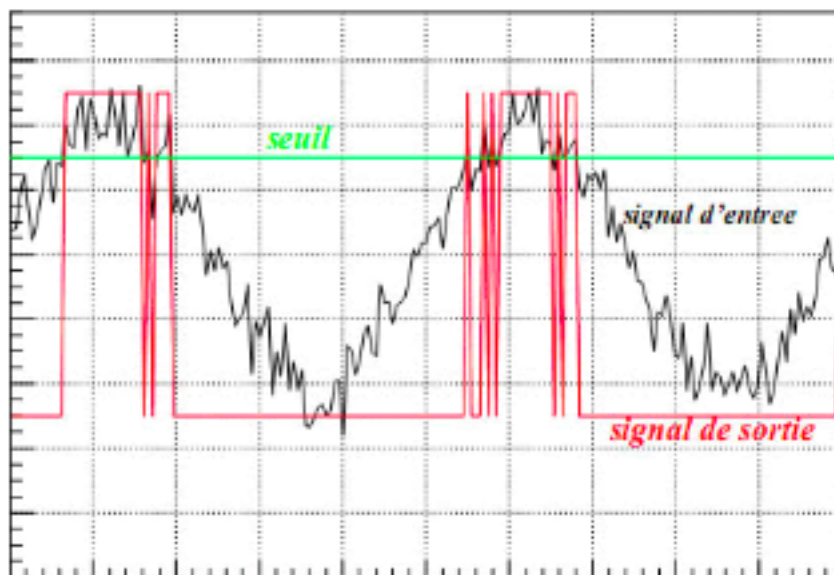


FIGURE 7.5 – Le cycle de déclenchement

Pour éviter ce problème, on utilise un comparateur à double seuil :  
toute les tensions parasites ayant une amplitude inférieure à la tension de différence entre les deux seuils seront ignorées.

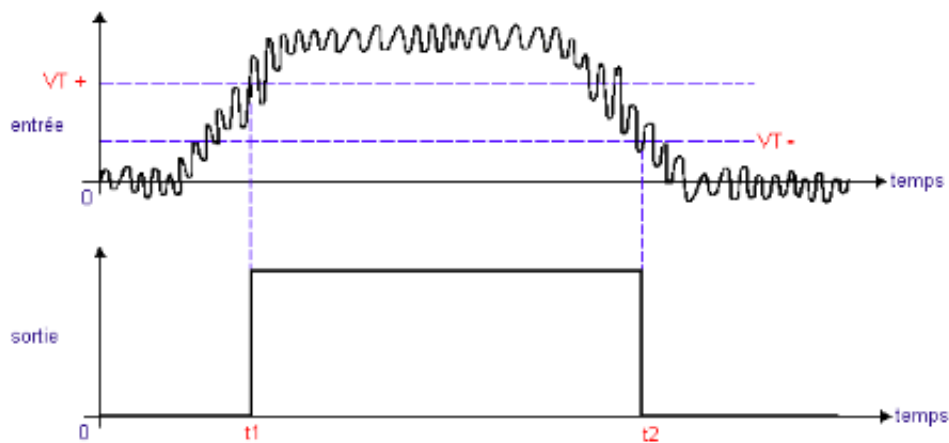


FIGURE 7.6 – Le principe

On va chercher les deux valeurs de basculement :

$$E_+ = \frac{V_e R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2}$$

$$E_- = U_0 = 0$$



Étudions le cas où  $\varepsilon > 0$

$$\varepsilon > 0 \Leftrightarrow E_+ > E_- \quad (7.1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2} > U_0 \quad (7.2)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2}{R_1 + R_2} > U_0 - \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} \quad (7.3)$$

$$\Leftrightarrow V_e R_2 > R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1 \quad (7.4)$$

$$\Leftrightarrow V_e > \frac{R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1}{R_2} \quad (7.5)$$

Ici,  $U_0 = 0$  et  $V_s = V_{sat+}$  car  $\varepsilon > 0$

D'où  $V_e > \frac{-V_{sat} + R_1}{R_2}$

#### Remarque

$U_0$  peut être différent de  $0V$  en mettant une source de tension sur  $E_-$

Étudions le cas où  $\varepsilon < 0$  :

$$\varepsilon < 0 \Leftrightarrow E_+ < E_- \quad (7.6)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2} < U_0 \quad (7.7)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2}{R_1 + R_2} < U_0 - \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} \quad (7.8)$$

$$\Leftrightarrow V_e R_2 < R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1 \quad (7.9)$$

$$\Leftrightarrow V_e < \frac{R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1}{R_2} \quad (7.10)$$

Ici,  $U_0 = 0$  et  $V_s = V_{sat-}$  car  $\varepsilon < 0$

D'où  $V_e < \frac{-V_{sat} + R_1}{R_2}$

On obtient deux seuils  $S1$  et  $S2$  de valeurs respectives :

$$\frac{-V_{sat} + R_1}{R_2} \text{ et } \frac{V_{sat} - R_1}{R_2}$$

Afin de basculer, la tension d'entrée doit dépasser  $S1V$  et afin de basculer dans l'autre sens, la tension d'entrée doit être inférieure à  $S2V$

On obtient le cycle d'hystérésis suivant :

$$(VB = S2 \text{ et } VH = S1)$$

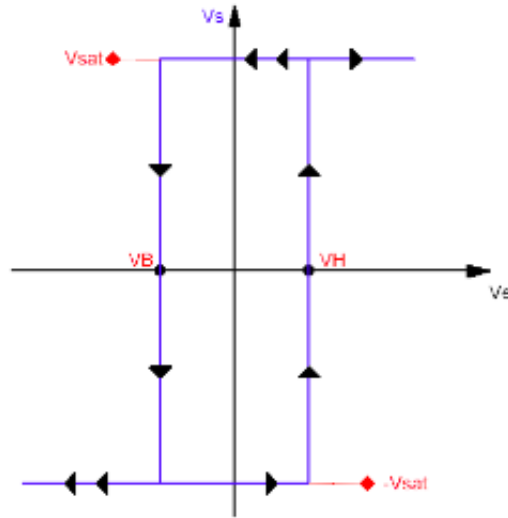


FIGURE 7.7 – Cycle d'hystérésis non inverseur

$$U_{milieu\_de\_cycle} = (V_{seuil1} + V_{seuil2}) \cdot 0.5$$

$$Largeur_{cycle} = V_{seuil1} - V_{seuil2}$$

## Comparateur inverseur double seuil

### Montage

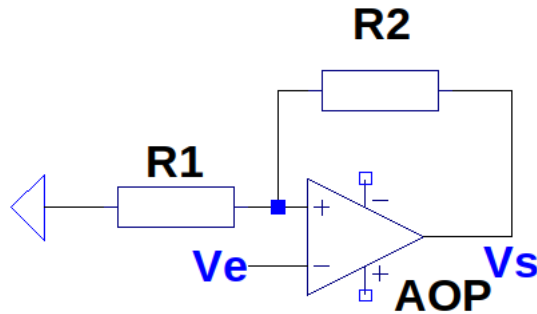


FIGURE 7.8 – Montage comparateur inverseur double seuil

### Démonstration

La démarche est rigoureusement identique avec  $\varepsilon > 0$ , on a  $V_s = V_{sat+}$  et pour  $\varepsilon < 0$  on a  $V_s = V_{sat-}$

On obtient le cycle d'hystérésis suivant :

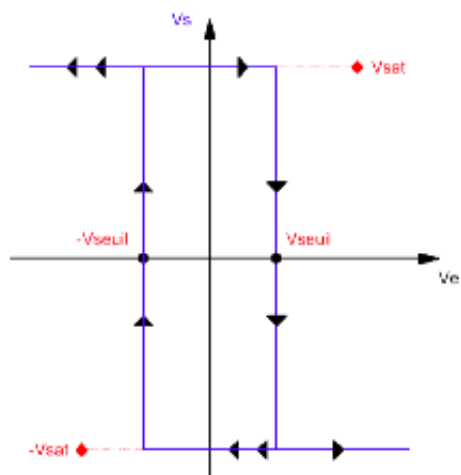


FIGURE 7.9 – Cycle d'hystérésis inverseur

## Présentation

Ce montage intègre une tension d'entrée.

En sortie, on obtient une tension  $V_s$  valant  $V_s = k \cdot \int V_e$

## Montage

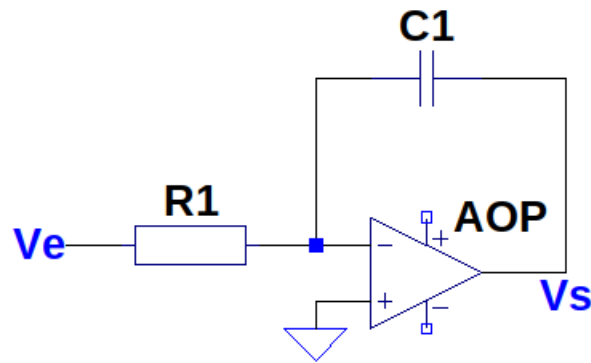


FIGURE 8.1 – Montage intégrateur

## Démonstration

Montage en mode linéaire car contre-réaction négative.

$$I_{R1} + I_{C1} = 0 \quad \Leftrightarrow I_{R1} = -I_{C1} \quad (8.1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{E}{R} = -C \cdot \frac{dV_s}{dt} \quad (8.2)$$

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{RC} \cdot E = \frac{dV_s}{dt} \quad (8.3)$$

$$\Leftrightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e \quad (8.4)$$

$$k = -\frac{1}{RC} \quad (8.5)$$

Ce montage est notamment présent dans certains Convertisseurs Analogiques Numériques dit “simple” ou “double” rampe.

## Application

**Exemple 4.** *On souhaite générer un signal triangulaire.*

En intégrant un signal rectangulaire, on obtient un signal triangulaire.

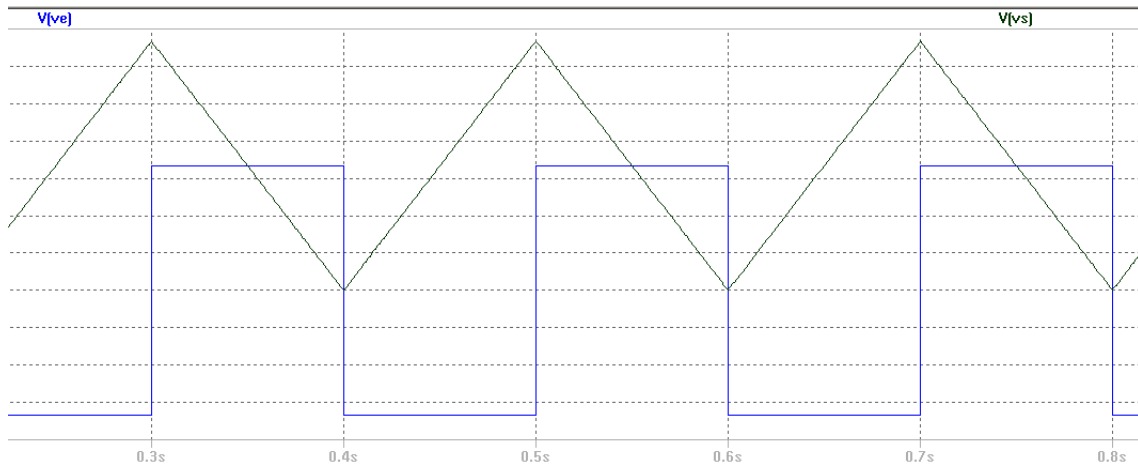


FIGURE 8.2 – Un signal triangulaire généré depuis un signal carré

Soit  $V_e = 2V$  ou  $V_e = -2V$

Si  $V_e = 2V$

$$k \int V_e = kV_e \cdot t + x \quad (8.6)$$

$$= -\frac{2}{RC}t + c \quad (8.7)$$

avec  $k = -\frac{1}{RC}$

$\Rightarrow$  droite d'équation  $y = -\frac{2}{RC}t + c$

Si  $V_e = -2V$

$$k \int V_e = kV_e \cdot t + x \quad (8.8)$$

$$= \frac{2}{RC}t + c \quad (8.9)$$

avec  $k = -\frac{1}{RC}$

$\Rightarrow$  droite d'équation  $y = \frac{2}{RC}t + c$

## Présentation

Ce montage permet de soustraire deux tensions d'entrée afin d'obtenir la différence en sortie.

## Montage

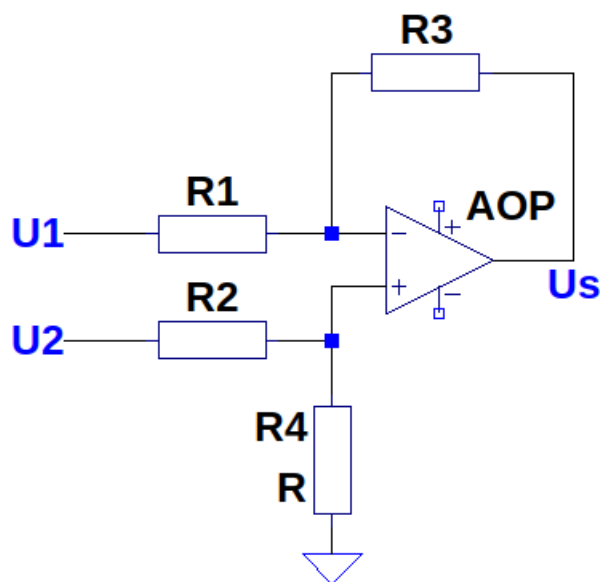


FIGURE 9.1 – Montage soustracteur

## Démonstration

Contre-réaction négative donc mode linéaire.

$$E_+ = U_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

$$E_- = \frac{\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_5}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}} \quad (9.1)$$

$$= \frac{U_1 R_3 + U_5 R_1}{R_1 + R_3} \quad (9.2)$$

Or  $E_+ = E_-$

$$\Leftrightarrow U_2 \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4} = \frac{U_1 R_3 + U_5 R_1}{R_1 + R_3} \quad (9.3)$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_5 R_1}{R_1 + R_3} = \frac{U_2 R_4}{R_2 + R_4} - \frac{U_1 R_3}{R_1 + R_3} \quad (9.4)$$

$$\Leftrightarrow U_5 R_1 = \frac{R_4(R_1 + R_3)}{R_2 + R_4} - \frac{U_1 R_3}{R_1} \quad (9.5)$$

Si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , on obtient :

$$U_s = U_2 - U_1$$

## Application

**Exemple 5.** On souhaite mesurer une tension entre deux points  $A$  et  $B$  d'un circuit (tension différentielle)

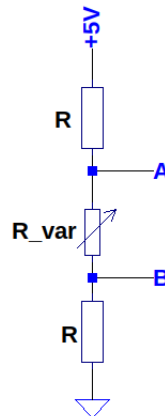


FIGURE 9.2 – Tension différentielle  $AB$

Pour étudier la différence de potentiel entre les deux points du circuit, on peut utiliser un montage soustracteur afin qu'en sortie du montage avec l'AOP, on ait :

$$V_s = V_a - V_b$$

On peut réaliser le montage suivant.

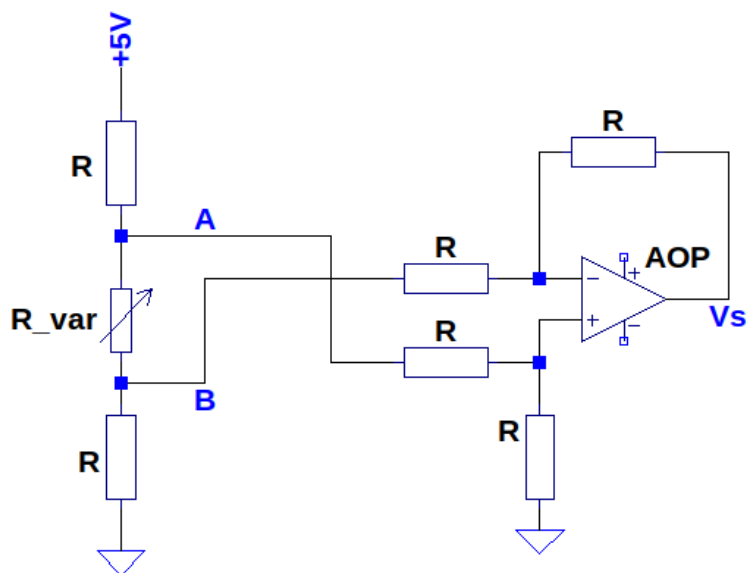


FIGURE 9.3 – Un montage pour lire une tension entre deux points



## Présentation

Ce montage permet d'additionner en sortie plusieurs tensions d'entrée. Avec ce montage, la tension de sortie est multipliée par un coefficient -1

## Montage

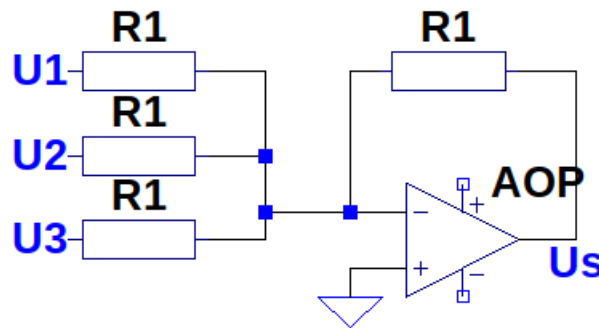


FIGURE 10.1 – Montage sommateur inverseur

## Démonstration

Contre-réaction négative donc montage linéaire.  
On applique le théorème de Millman<sup>1</sup>

$$E_+ = 0$$

$$E_- = \frac{\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_1} + \frac{U_s}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1}} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_1 + U_2 + U_s}{R_1} = 0 \quad (10.1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_s}{R_1} = \frac{-(U_1 + U_2)}{R_1} \quad (10.2)$$

$$\Leftrightarrow U_s = -(U_1 + U_2) \quad (10.3)$$

---

1. on fera abstraction de U3

Dans le cadre du projet d'électrostatique de S4, nous avons été amené à réaliser un dossier sur le condensateur. Ainsi, ce document traitera dans une première partie de l'histoire du condensateur. Ensuite, dans un second temps nous tenterons d'expliquer le fonctionnement du condensateur pour ensuite voir les différentes technologies qui lui sont associées. Nous évoquerons par la suite les domaines d'applications du condensateur. Nous verrons que le condensateur fait parti des éléments de base de tout circuit électronique. Son usage est donc primordial dans tous les systèmes qui nous entourent. Ce qui nous amènera enfin à s'intéresser à l'avenir du condensateur en électronique.

C'est en 1745, que le physicien allemand Ewald Georg von Kleist invente le premier condensateur. Il a enroulé une feuille d'argent autour d'une bouteille en verre, et a chargé la feuille à l'aide d'un générateur à friction. Il était convaincu qu'une charge pourrait être accumulée lorsqu'il a reçu un choc électrique significatif (par un générateur par exemple).

Un an plus tard, Pieter van Musschenbroek poursuivra les recherches sur cette invention et lui donnera le nom de : "bouteille de Leyde". Pour la petite histoire, ce nom vient de l'université où travaillait ce dernier : l'université de Leyde. Le condensateur est une véritable révolution car il permet de contenir une importante charge électrique dans un très petit volume. La bouteille de Leyde est un condensateur formé de deux conducteurs séparés par le verre de la bouteille. Le premier conducteur est généralement constitué d'une électrode supérieure, reliée à des feuilles en étain mises dans la bouteille. Le second conducteur est formé par une feuille métallique autour la bouteille. Ces deux conducteurs permettent de créer deux charges égales mais de signes opposées.

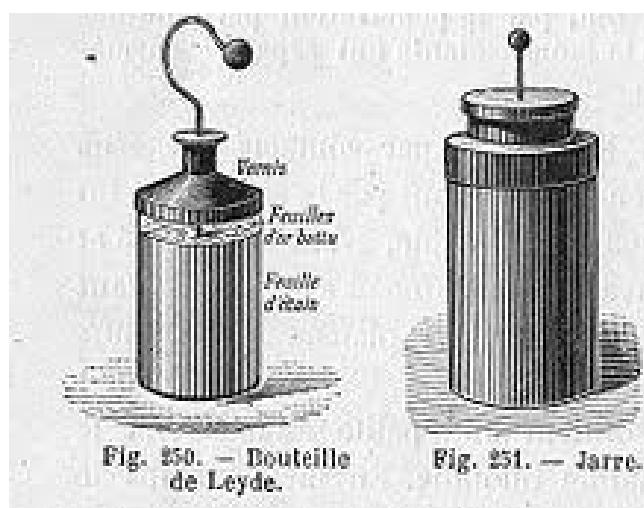


FIGURE 12.1 – Bouteille de Leyde

Puis avec le temps, d'autres condensateurs ont vu le jour :



FIGURE 12.2 – Différents types de condensateurs

# Principe de fonctionnement

Un condensateur est un dipôle électrique composé de deux armatures conductrices appelées électrodes et séparées par un matériel isolant ou diélectrique.

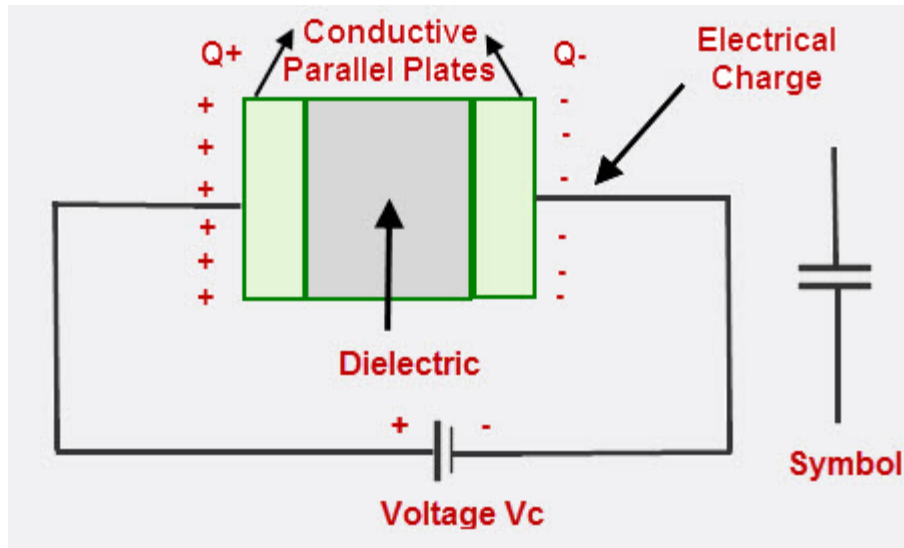


FIGURE 13.1 – schéma condensateur

Lorsque l'on exerce une tension sur un condensateur, une force électrique déplace des électrons vers la première armature pour s'y déposer. Cette augmentation du nombre d'électrons vient charger négativement l'armature. Une force se crée entre les deux plaques et vient arracher des électrons à la seconde armature et donc charger positivement l'armature.

Malgré la présence d'un isolant entre les deux plaques, le courant dans le circuit n'est pas nul. En effet, tant que le condensateur n'est pas chargé, un nombre d'électrons arrive vers le condensateur. Le nombre d'électrons arrivant sur la première plaque est égal au nombre d'électrons quittant la seconde plaque. Des charges sont arrachées à la seconde armature et continuent de se déplacer dans le circuit.

Le condensateur continue de se charger tant que la tension entre les deux armatures n'est pas égale à la tension exercée sur ses bornes. Si on exerce une tension sur le condensateur supérieur à sa tension admissible, le composant va casser ou exploser. Lorsque le condensateur est complètement chargé, les nouveaux électrons arrivant sont repoussés par ceux déjà présents sur la plaque, il n'y a plus déplacement de charges, le courant devient nul.

Un condensateur est caractérisé par un coefficient de proportionnalité entre la charge et la tension à ses bornes. On note ce coefficient capacité électrique et il s'exprime en Farad.

$$Q = C(V_1 - V_2) \text{ ou } i = C \frac{du}{dt}$$

La capacité d'un condensateur est déterminée par la géométrie du composant et la nature de l'isolant.

Le tableau suivant résume la valeur de capacité pour différente géométrie de condensateur.  $\varepsilon_r$  représente la permittivité relative de l'isolant.

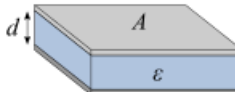
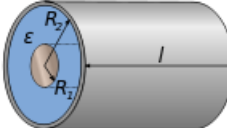
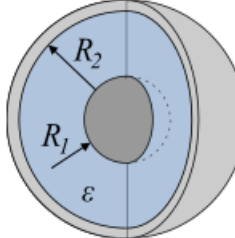
Désignation	Capacité	Champ électrique	Représentation
Condensateur plan	$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$	$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}$	
Condensateur cylindrique	$C = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$	$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \varepsilon_0 \varepsilon_r}$	
Condensateur sphérique	$C = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$	$E(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}$	
Sphère	$C = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r R_1$		

FIGURE 13.2 – calcul capacité

# Les différentes technologies

Au cours de l'histoire plusieurs technologies ont été découvertes afin de fabriquer des condensateurs. Cela nous offre maintenant, un large choix de technologies suivant les utilisations et, ou les valeurs en Farad nécessaires. Afin de mieux comprendre les avantages et les inconvénients de chaque technologie, nous allons en faire une comparaison des plus couramment utilisées.

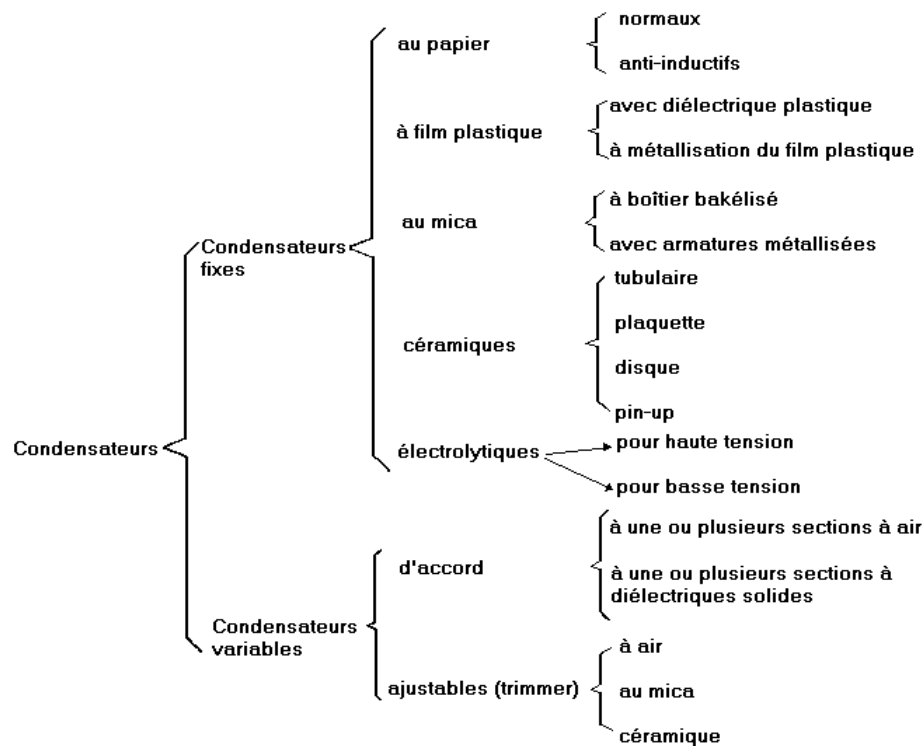


FIGURE 14.1 – Classification des différents types de condensateur

La figure 14.1 récapitule tous les types de condensateurs. Ils sont divisés en 2 catégories, les condensateurs à capacité fixes et ceux à capacité variable. Nous allons par la suite nous intéresser majoritairement au condensateur à capacité fixe car ce sont ceux le plus répandus.

## Les condensateurs à film

Ces condensateurs utilisent un film plastique. Il en existe de 2 types, suivant l'utilisation du film plastique. Ceux de type un utilisent un film plastique comme diélectrique, c'est-à-dire comme moyen de limiter ou empêcher la conduction électrique mais laissant s'exercer les forces électrostatiques. Ceux de type deux utilisent quant à eux un film plastique métallisé.

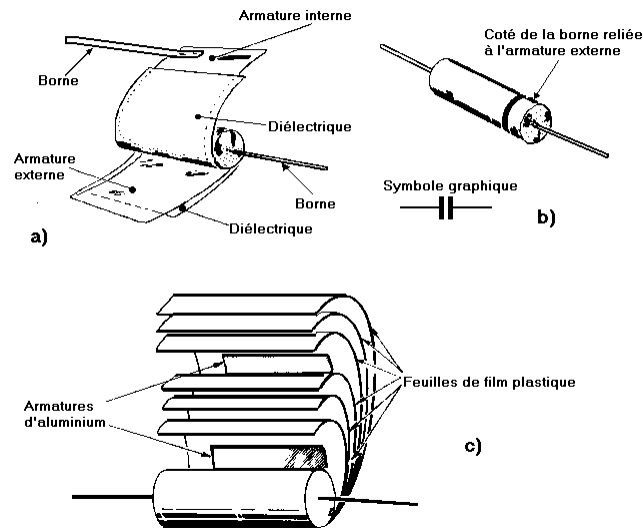


FIGURE 14.2 – Schéma interne d'un condensateur à film plastique

Ces condensateurs possèdent une faible capacité comprise entre  $1\text{nF}$  et  $30\mu\text{F}$ , mais à défaut permettent une très grande précision. Ils possèdent également une durée de vie supérieure à la plupart des autres types de condensateurs et ne sont pas polarisé. De plus, certains de ces condensateurs permettent une régénération après un claquage. Ils sont également conçus pour résister à de hautes tensions (de l'ordre du kilovolt) et permettent de fournir des impulsions de courant de surcharge très élevées.

## Les condensateurs à céramique

Ce type de condensateur est celui majoritairement utilisé. Ils sont notamment très utilisés en électronique du fait de leur petite taille. Ils permettent des capacités comprises entre 1nF et 1μF. Ils ne sont pas polarisés comme les condensateurs à film ce qui permet leur utilisation dans des circuits à courant alternatif. Il en existe également 2 types :

- Ceux de classe 1 sont utilisés lorsque l'on nécessite une grande stabilité et de faible perte. Ils possèdent une valeur de capacité très stable.
- Ceux de classe 2 possèdent une capacité élevée. Ils perdent cependant en stabilité thermique et les tolérances de capacité sont plus élevée.

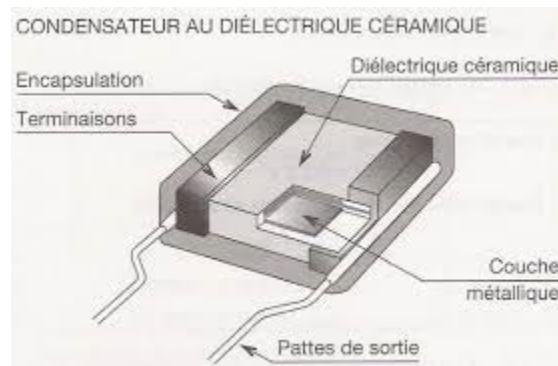


FIGURE 14.3 – Schéma interne d'un condensateur à céramique



## Les condensateurs électrolytiques

Les condensateurs électrolytiques ou encore condensateurs chimiques, utilisent un électrolyte, c'est-à-dire une substance conductrice contenant des ions mobiles. Cela permet à ces condensateurs de pouvoir fournir une plus grande plage de valeur de capacité que les autres types de condensateur. Ils sont dans la très grande majorité polarisés ce qui oblige leur utilisation dans des circuits à courant continu. On en voit très souvent dans des alimentations notamment d'ordinateur etc... Ils permettent une capacité comprise entre  $1\mu\text{F}$  et  $47\text{mF}$  avec une tension de fonctionnement pouvant aller à l'ordre de quelques centaines de volts. Ils ne sont cependant pas très précis. En effet il possède une tolérance de 20%, une grande résistance en série et réagissent très mal aux hautes fréquences (surchauffe).

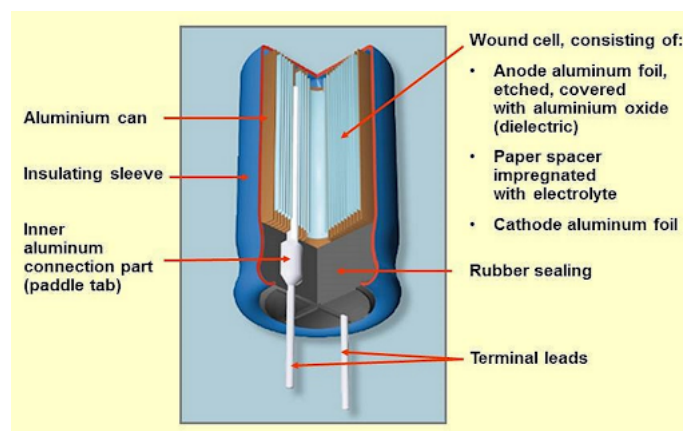


FIGURE 14.4 – Schéma interne d'un condensateur électrolytiques

## Les condensateurs variables

Les condensateurs variables sont des condensateurs dont la valeur de la capacité est comme son nom l'indique variable. Ils sont constitués d'un rotor, d'un axe et d'un stator.

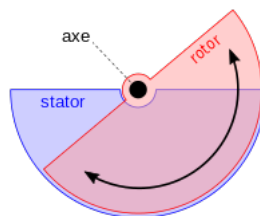


FIGURE 14.5 – Schéma interne d'un condensateur variable

Le rotor entraîné par l'axe tourne dans l'armature fixe du stator. La capacité de ces condensateurs varie en continu entre une valeur minimum appelé capacité résiduelle et une valeur maximum appelée capacité nominale.

Cette variation suit une fonction appelée loi de variation :

$$C = f(\theta) \quad (14.1)$$

$f()$  dépend de multiples paramètres complexes. Il est donc difficile de pouvoir le définir clairement.

$\theta$  quant à lui correspond à l'angle de rotation de l'axe.

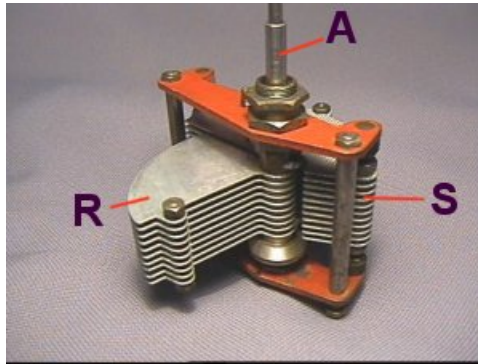


FIGURE 14.6 – Condensateur à capacité variable

Nous avons pu dans cette partie, nous intéresser à différents types de condensateur. Il en existe encore plein d'autres comme les condensateurs au mica, au papier... Mais nous avons vu ici, ceux les plus couramment utilisés.

Nous allons présenter trois domaines d'application des condensateurs. Cette liste n'est pas exhaustive. Les condensateurs permettent également de redresser le cosinus  $\Phi$  ou bien de filtrer des signaux audio.

## Les condensateurs de filtrage

### Présentation

Les condensateurs permettent de lisser une tension afin de stabiliser cette dernière.

### Objectif

On souhaite amortir les oscillations de tension en sortie d'un pont de Graëtz (14 V DC). On souhaite donc passer d'une tension alternative à une tension pseudo-continue.

### Mise en oeuvre

Afin de lisser la tension, il convient de mettre un condensateur en sortie du pont de Graëtz, avec une borne sur INPUT et une autre à la masse.

Une résistance de  $50\ \Omega$  a été rajoutée pour simuler la présence d'une charge.

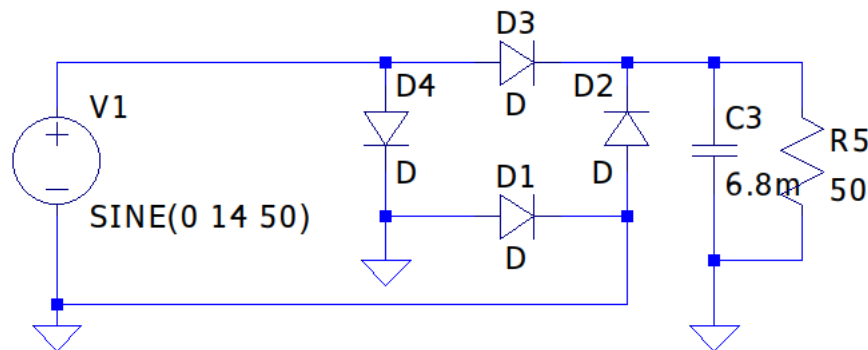


FIGURE 15.1 – Le circuit de filtrage

Observons le résultat.

### Principe

Le condensateur joue le rôle d'accumulateur. Pendant les phases où la tension est croissante, ce dernier se charge.

Lors des phases où la tension décroît, le condensateur restitue une partie de son énergie, ce qui a pour effet de réduire l'amplitude de variation de tension.

On retrouve notamment ces condensateurs dans les alimentations linéaires. Dans ce cas, la capacité du condensateur nécessaire croît avec le courant demandé par la charge.

Il est fréquent de voir des condensateurs chimiques de quelques mF dans ces alimentations. Une valeur inférieure risque de rendre instable l'alimentation.

## Les condensateurs de découplage

### Présentation

Certains circuits nécessitent une alimentation très stable (aucune fluctuation de la tension d'entrée). Cependant, lors de l'utilisation du circuit, des courants importants peuvent être demandés par le circuit.

Nous allons montrer un cas en exemple où, pour améliorer les performances du circuit, il conviendra de mettre de fameux condensateur de découplage.

### Objectif

Nous souhaitons cascader deux portes logiques CMOS<sup>1</sup> de type inverseur, comme le montre la figure suivante.

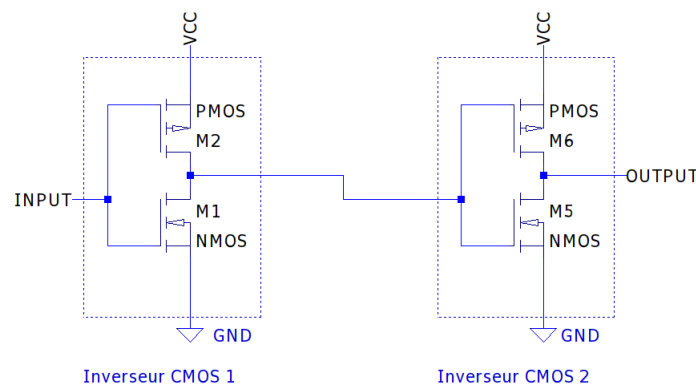


FIGURE 15.2 – Schéma d'exploitation

A première vue, ce modèle peut sembler satisfaisant. Cependant, nous souhaitons faire fonctionner ce circuit dans des fréquences assez élevée<sup>2</sup>.

En prenant un modèle réel, on peut déjà prendre en compte les capacités parasites des transistors MOSFETs. Ces derniers possèdent une capacité entre la broche de commande (Gate) et la masse.

Le modèle réel des entrées de chaque porte logique est le suivant.

1. Complementary MOS : MOS complémentaires, mise en cascade d'un MOS canal P et d'un MOS canal N
2. Toutefois inférieures à la fréquence maximale du circuit

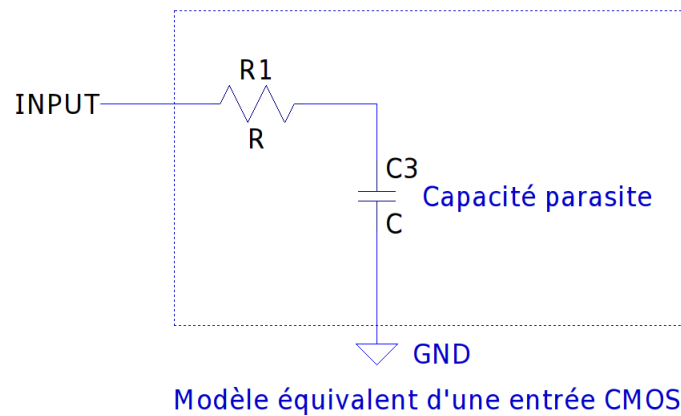


FIGURE 15.3 – Modèle équivalent des entrées CMOS

### En régime transitoire

Intéressons nous au régime transitoire.

On constate que dans notre cas d'exemple, les grilles des MOSFETS consomment du courant pendant les phases de commutation, du fait qu'il faut charger ou décharger les condensateurs. Cet appel de courant peut faire réduire la tension d'alimentation si cette dernière n'est pas très puissante.

### En régime stationnaire

Lorsque la tension d'entrée (INPUT) est constante et que le condensateur est chargé (ou déchargé), les grilles des MOSFETs ne sont parcourus par aucun courant

### Le modèle réel

L'alimentation étant rarement en liaison directe avec le circuit logique (piste de circuit imprimé, fils d'alimentation), on constate l'apparition d'une inductance parasite entre la borne d'alimentation du circuit et l'alimentation en elle-même. Le modèle équivalent final du circuit peut être modélisé par la figure suivante.

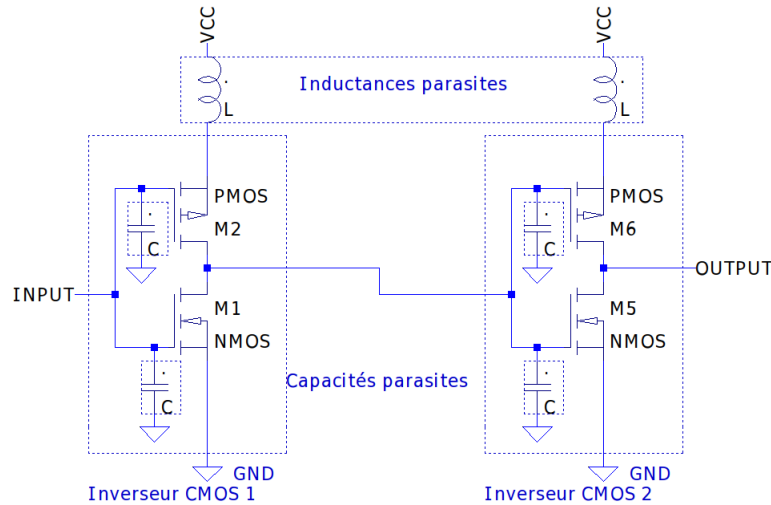


FIGURE 15.4 – Modèle équivalent du circuit

L'inductance parasite s'oppose aux variations de tensions.

Ainsi, lors des phases de commutation (régime transitoire), une partie de la tension d'alimentation va au bornes des inductances parasites. De ce fait, le circuit est de moins en moins efficace à mesure que l'on augmente la fréquence du signal d'entrée. Pour pallier à ce problème, nous allons ajouter un condensateur de découplage.

### Mise en oeuvre du condensateur de découplage

Le condensateur de découplage doit être placé au plus près du circuit à alimenter. Une de ses bornes est reliée à la broche d'alimentation du circuit et la seconde à la masse.

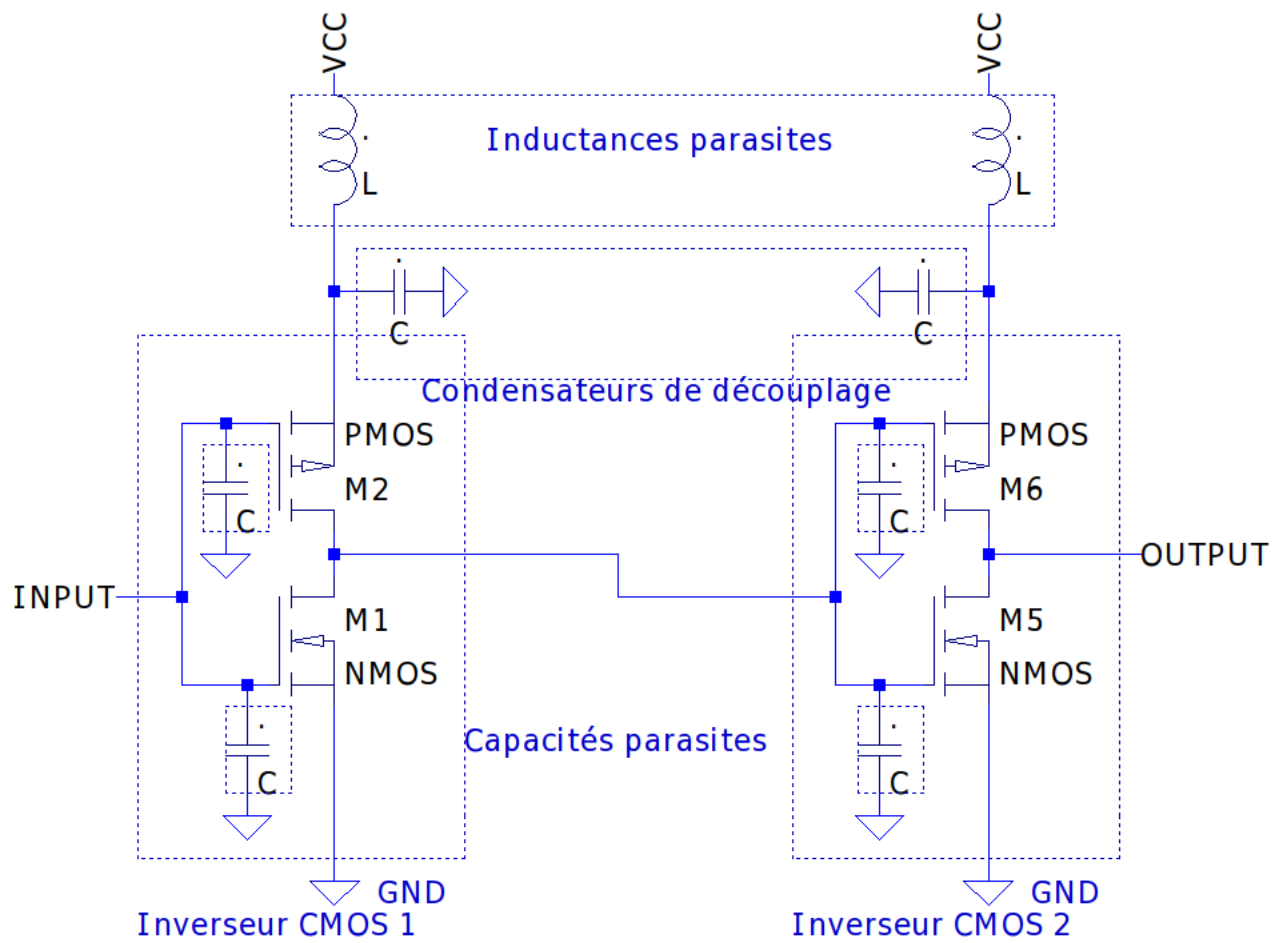


FIGURE 15.5 – Le placement du condensateur de découplage

Lorsque le circuit en aval va demander du courant lors des commutations, le condensateur, qui va se charger pendant le régime permanent du circuit, va pouvoir fournir un apport de courant qui évitera à la tension d'alimentation de s'écrouler. Le circuit sera plus efficace et les temps de communication seront plus faibles.

D'un point de vue des filtres, ces condensateurs peuvent être considérés comme des filtres passe-bas. En effet, la tension d'alimentation qui varie est vue comme un signal haute fréquence. Il faut donc éviter l'oscillation haute fréquence.

## Les condensateurs de liaison

### Présentation

Une des propriétés des condensateurs est de bloquer les composantes continues. Nous allons aborder un exemple où le condensateur va permettre de se passer d'une alimentation symétrique.

## Objectif

On souhaite amplifier la composante alternative d'un signal d'amplitude 1V, de tension moyenne 0.5V et de fréquence 1kHz avec un AOP alimenté en 0-12V (Alimentation asymétrique).

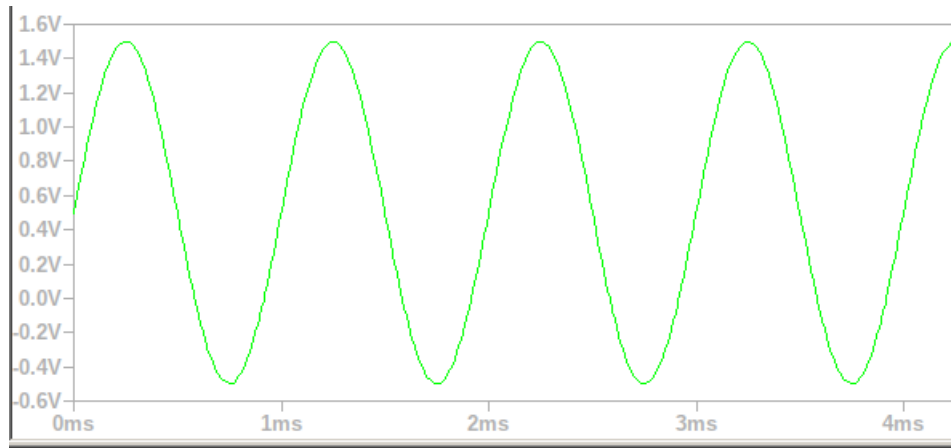


FIGURE 15.6 – Le signal à amplifier

## Mise en oeuvre

Tout d'abord, on va chercher à recentrer le signal pour avoir une composante alternative toujours positive. Pour cela, on utilise le circuit suivant.

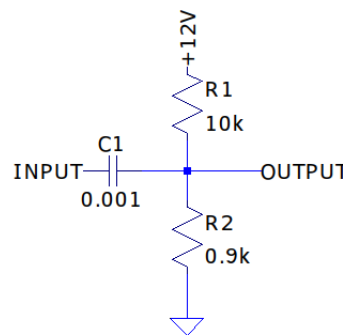


FIGURE 15.7 – Montage pour recentrer la tension

La fréquence de coupure valant  $\frac{1}{2\pi RC}$  avec  $R < 10k\Omega$ , il faudra prendre un condensateur tel que la fréquence de coupure soit inférieure à la fréquence du signal d'entrée. Un condensateur de 1 mF conviendra donc pour cette application.

En utilisant le théorème de superposition au point OUTPUT, on en déduit que une résistance de  $10k\Omega$  et une résistance de  $900\Omega$ , on obtient la tension OUTPUT suivante.



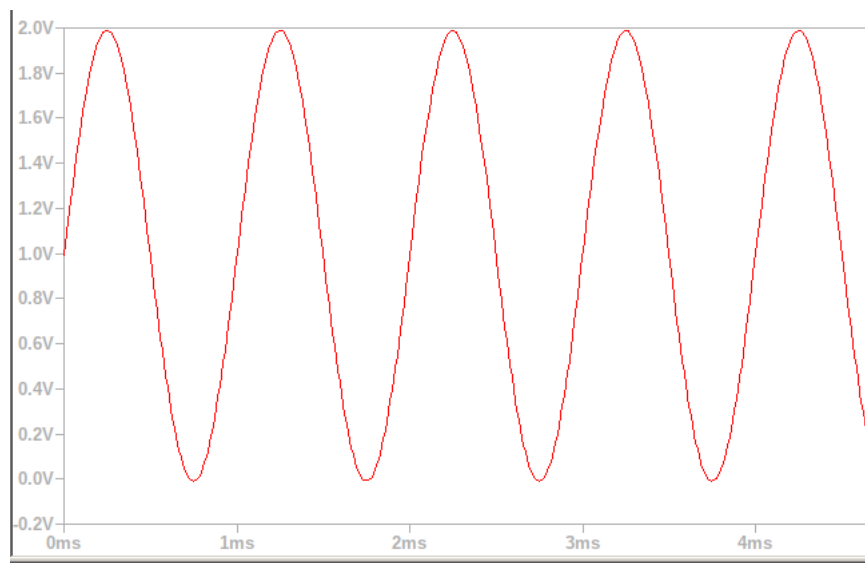


FIGURE 15.8 – Tension positive

Il nous reste à amplifier la tension OUTPUT (ici par 2). Nous obtenons donc une tension sinusoïdale d'amplitude 2V.

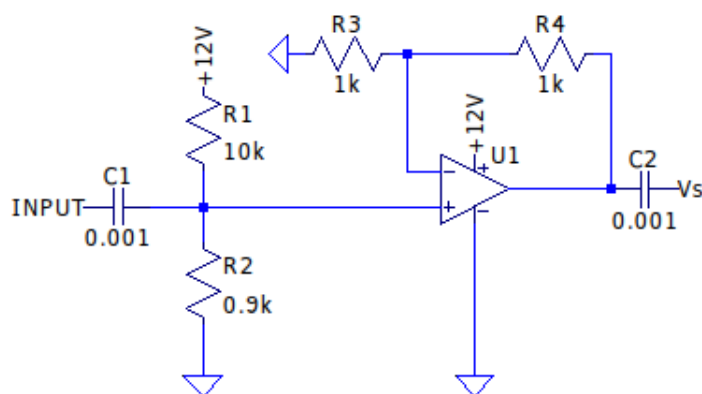


FIGURE 15.9 – Schéma avec les deux condensateurs de liaison

Pour extraire la composante alternative, il suffit de mettre en sortie un condensateur qui va recentrer le signal en 0V. Le condensateur sera de 1mF (même fréquence). Nous obtenons finalement un signal de sortie avec un gain de 2 de la composante alternative d'entrée.

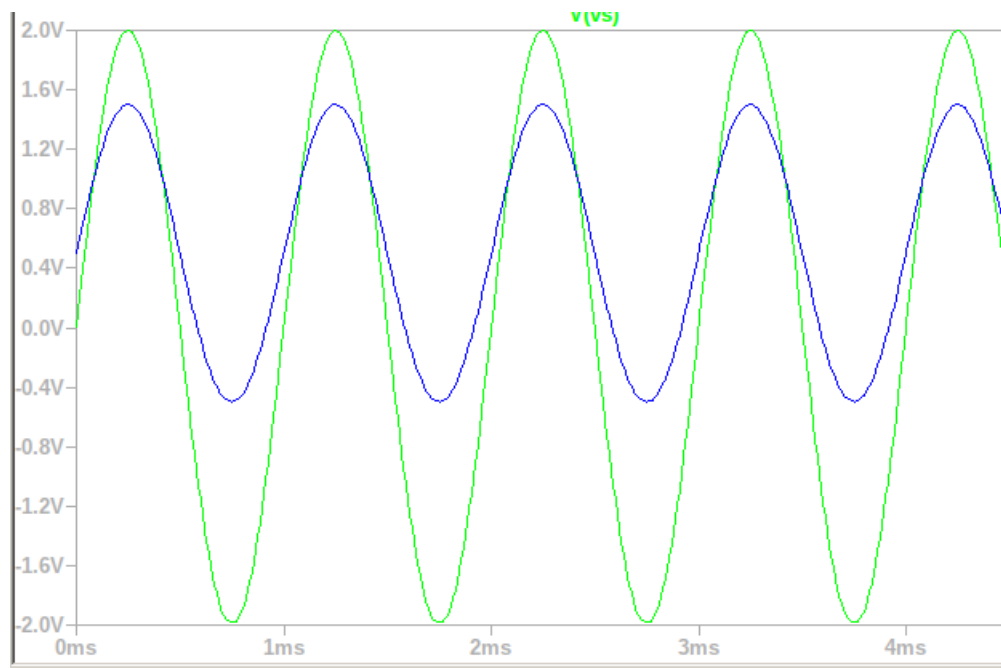


FIGURE 15.10 – La tension de sortie

Au final, les deux condensateurs permettent à des portions de circuits de communiquer entre elles avec des niveaux de tension différents. Ces condensateurs sont appelés **condensateurs de liaison ou de couplage**

Nous avons donc vu dans les parties précédentes que le condensateur est un élément essentielles à tout circuits électronique. Nous nous sommes donc posé la question suivante : Le condensateur sera-t-il amené à disparaître dans le futur pour être remplacé par un autre composant ? Il est évident que l'importance du condensateur est telle qu'il parait irremplaçable. En effet, on ne peut se passer d'un telle composant dans un circuit électronique. Cependant, depuis quelques années un composant est utilisé de plus en plus : le super-condensateur.

## Les supercondensateurs

Les supercondensateurs sont une sous-catégorie des condensateurs électrolytiques. Ils permettent de stocker une très grande quantité d'énergie grâce à une combinaison de 2 technologies de capacité. La capacité double couche que l'on retrouve dans les condensateurs électrolytiques et la pseudo-capacité. L'une est électrostatique et l'autre électrochimique.

Cela leur permet de combiner les caractéristiques des condensateurs ordinaires et celles des batteries. En effet grâce à ces technologies ils peuvent atteindre des capacités allant jusqu'à 12 000F, tout en ayant des temps de charge et décharge très rapide comparable aux condensateurs ordinaires. Toutes ces caractéristiques en feraient de bons candidats pour remplacer nos batteries au lithium. Mais c'était sans compter leurs défauts. Ils sont en effet très chers à produire, possèdent une faible énergie spécifique (Rapport en Wh/kg entre l'énergie électrique fournie par unité de temps et la masse du convertisseur) et une tension de décharge linéaire. Cela entraînerait de grandes chutes de tension d'alimentation très rapidement. Le supercondensateur sera probablement l'avenir pour le stockage d'électricités, qui a terme remplacera sûrement les batteries des véhicules électriques. Cependant, il est trop puissant pour le mettre dans la majorité des circuits électroniques. La science progresse énormément dans ce domaine.

*« En dépit des perfectionnements électroniques, il advient parfois que la bonne vieille feuille imprimée soit le moyen d'information le plus pratique. »*

---

Arthur Charles Clarke

Pour certains projets plus évolués, on souhaite utiliser des composants tels que des moteurs ou des résistances (chauffage, ventilation). Or, on constate rapidement que le branchement direct de ces éléments sur une carte Arduino va se révéler impossible.

En effet, la carte Arduino est prévu pour délivrer de **faibles courants** et **faibles tensions**. Nous allons donc créer un circuit où la puissance et la commande sont dissociés.

## Présentation

Une des moyens pour créer notre circuit de puissance est le transistor bipolaire. Ce composant possède trois broches :

- Le collecteur (C)
- la base (B)
- l'émetteur (E)

## Conventions

Afin de simplifier les calculs par la suite, posons les normes suivantes :

- Le courant entrant dans le Collecteur est appelé  $I_C$
- Le courant entrant dans la Base est appelé  $I_B$
- Le courant sortant de l'émetteur est appelé  $I_E$
- La tension entre la Base et l'Emetteur est appelée  $V_{be}$
- La tension entre le Collecteur et l'Emetteur est appelée  $V_{ce}$

Les flèches au sein du transistor indiquent le sens de déplacement du courant sur les broches.

## Les familles de transistors bipolaires

Les transistors bipolaires sont classés en deux catégories :

- Les transistors NPN <sup>1</sup>
- Les transistors PNP

Le principe de fonctionnement est similaire entre ces deux familles, seul le branchement et le niveau de commande diffère.

Dans ce document, nous utiliserons essentiellement des transistors NPN car ces derniers utilisent des grandeurs positives.

---

1. Le nom de ces familles provient du type de jonction utilisé en interne. Pour plus de renseignement, consulter les diodes et semi-conducteurs

## Les paramètres de sélection du transistor

Notre transistor doit dans un premier temps répondre à deux contraintes :

- La tension admissible sur  $V_{ce}$ <sup>2</sup> doit être supérieur à la tension d'alimentation de notre circuit. Concrètement, si notre circuit est alimenté en 48V mais que le transistor ne supporte pas plus de 30V, il va être détruit.
- Le transistor doit supporter un courant plus élevé que le courant maximal transitant dans notre circuit. Pour contrôler un moteur consommant 1 Ampère, je dois donc choisir un transistor pouvant contrôler au moins 1 Ampère.

Pour la suite de la présentation, on supposera que notre transistor a été dimensionné pour répondre à ces deux contraintes.

## Le principe

Ce type de transistor fonctionne comme une vanne pour une canalisation. Il est possible de réguler le débit de la canalisation avec la vanne.

Le transistor bipolaire permet de contrôler un courant important avec un faible courant.

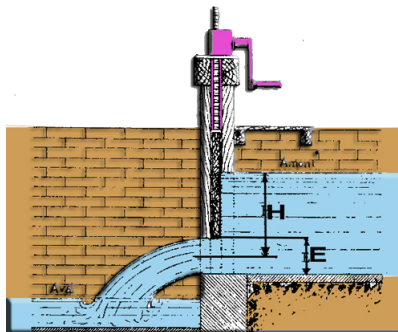


FIGURE 18.1 – Le rôle du transistor

Ici, notre transistor joue le rôle de la vanne et permet de bloquer le courant (électrons) ou bien de les laisser passer.

Le courant de l'élément à contrôler (moteur, résistance de puissance....) transite entre le collecteur et l'émetteur et le courant de commande passe par la base, comme l'illustre la figure suivante.

---

2. Cette tension est indiquée ddans les documentations techniques

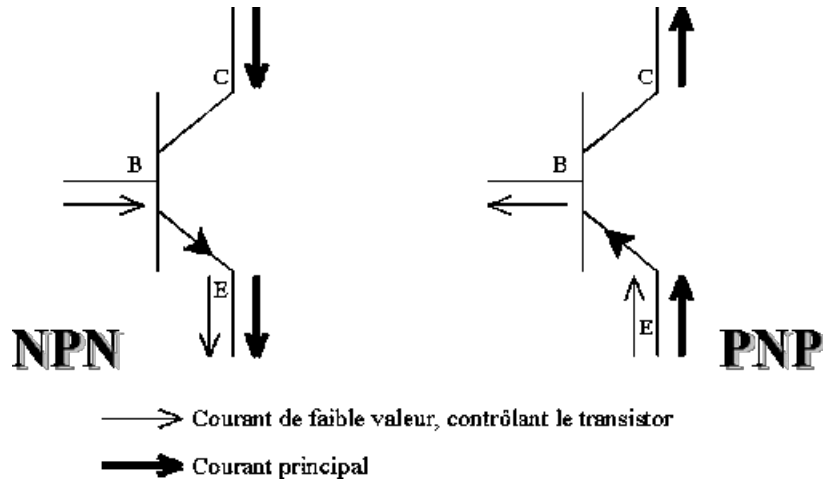


FIGURE 18.2 – Courant de commande et de puissance

La relation fondamentale reliant le courant de puissance et de commande est la suivante :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Le paramètre  $\beta$ , appelé **gain du transistor**<sup>3</sup> est une caractéristique interne de notre transistor, c'est à dire qu'il dépend du type de transistor que nous choisissons.

Les courants  $I_C, I_B, I_E$  sont exprimés dans la même unité (Ampère, milliampères..) pour une formule homogène.

Les transistors de puissance possède des gains de l'ordre de la dizaine alors que les transistors de signal (faibles courants) ont un gain pouvant facilement atteindre 200 ou 300.

#### Remarque

Plus notre  $\beta$  est faible, plus il va falloir injecter un courant important dans notre base

**Question 2.** Et que devient notre broche "**Émetteur**" ?

>>> **2.** Notre émetteur est relié à la masse du circuit et permet de le fermer pour que les électrons puissent circuler.

Le courant circulant dans l'émetteur est simplement la somme des courants entrant dans le transistor.

d'où :

$$I_E = I_B + I_C$$

## Exemple

3. le gain est sans dimension (unité) et est appelé  $h_{fe}$  dans les documentations

On souhaite commander l'arrêt et la marche d'un moteur consommant au maximum 0.5A et alimenté avec une tension de 9V.

Nous choisissons un transistor permettant de commuter 1A (sécurité) avec  $\beta = 30$

**Question 3.** *Quel doit-être le courant injecté dans la base ?*

>>> **3.** *On applique la formule précédent et on obtient :*

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.5}{30} = 16mA$$

## Mise en pratique

### Branchements

Maintenant que nous connaissons les tensions et courants nécessaires à notre transistor et à notre moteur, nous allons le commander avec une carte Arduino.

Tout d'abord, il convient de placer le moteur entre notre alimentation et le collecteur.

#### Remarque

Toutes les charges à contrôler avec ce type de transistor se placent entre l'alimentation et le collecteur.

Enfin, il ne nous reste plus qu'à relier une sortie numérique de l'Arduino vers notre base par l'intermédiaire d'une résistance.

**La résistance va servir à imposer le courant dans la base de notre transistor.**

Nous obtenons donc le schéma suivant.



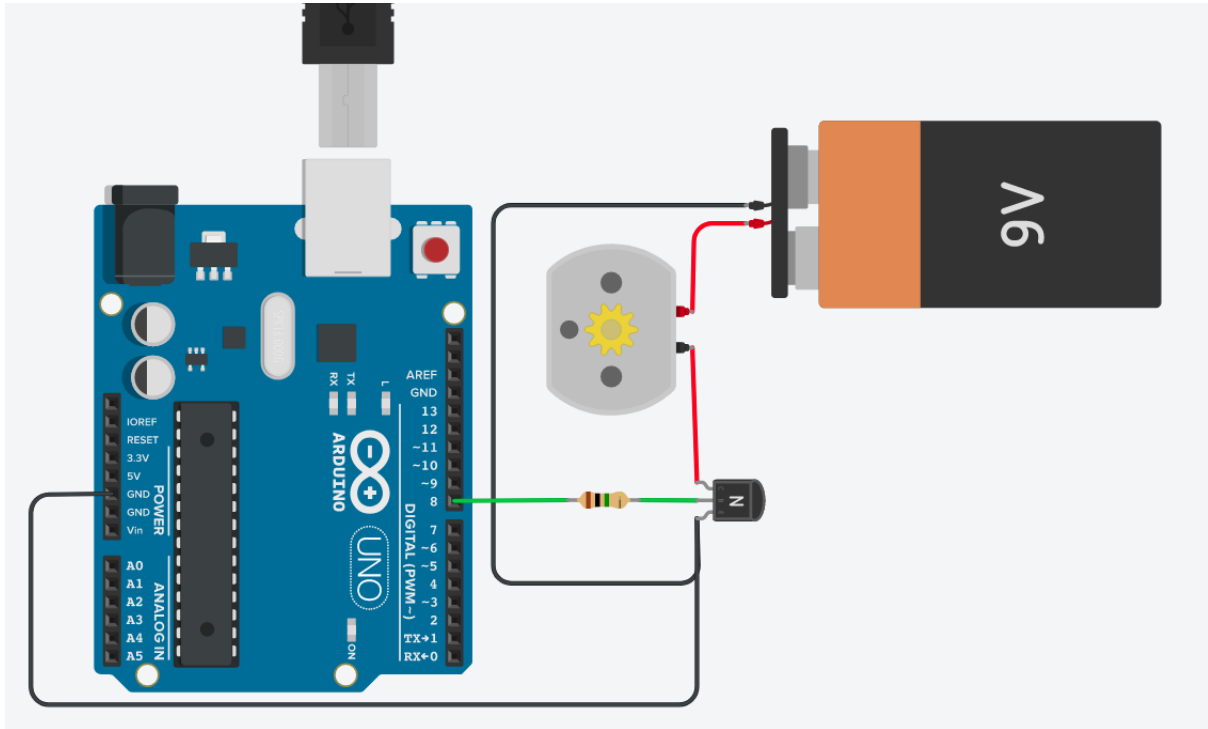


FIGURE 18.3 – Branchement du transistor bipolaire

## Dimensionnement de la résistance

On souhaite obtenir un courant de  $16mA$  dans notre base et on sait que l'Arduino délivre du  $5V$  en sortie.

Nous sommes donc tentés de dire que  $R_b = \frac{U_{arduino}}{I_B} = \frac{5}{0.016} = 312\Omega^4$

Hélas, il y a peu de chance que votre moteur tourne dans les conditions optimales. Il convient d'avoir à l'esprit que notre  $\beta$  trouvé dans la documentation n'est que théorique et qu'il peut être en réalité inférieur.

### Remarque

Une des conventions non officielles admet que pour de la commutation en **Tout ou Rien**<sup>a</sup>, on divise la valeur théorique de notre  $\beta$  par 2.

Nous allons donc prendre donc un  $\beta$  valant 15.

<sup>a</sup>. Le transistor laisse passer tout le courant nécessaire ou rien du tout

On refait donc les calculs.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.5}{15} = 32mA$$

4. On part de la loi d'Ohm qui dit que  $U = R.I$

Une dernière chose : les transistors bipolaires entraînent une chute de tension entre la base et l'émetteur ( $V_{be}$ ).

Cette chute de tension dépend de la technologie des transistors bipolaires :

- $0.7V$  pour les transistors au silicium
- $0.3V$  pour les transistors au germanium

Dans l'extrême majorité des cas, on utilisera des transistors au silicium.

La tension disponible aux bornes de la résistance est donc de  $4.3V$  ( $5 - 0.7$ )

D'où :

$$R_b = \frac{U_{arduino} - V_{be}}{I_b} = \frac{4.3}{0.032} = 134\Omega$$

## Exemple de programme Arduino

Voici un code permettant de faire tourner le moteur périodiquement pendant 5 secondes puis de l'arrêter pendant 5 secondes.

```
#define D8 8      //Broche 8 de l'Arduino

void setup() {

    pinMode(D8, OUTPUT); //Mise en sortie de la broche
}

//End setup

void loop() {

    digitalWrite(D8, HIGH);    //Déclencher la rotation du moteur
    delay(5000);               //Délai de 5s
    digitalWrite(D8, LOW);     //Fin de la rotation du moteur
    delay(5000);               //Délai de 5s
}

//End loop
```

Code Arduino avec transistors NPN

## Présentation

Nous avons vu l'utilisation des transistors bipolaires.

Ces derniers sont assez contraignants à mettre en oeuvre car ils sont commandés en courant.

Nous allons utiliser cette fois-ci la technologie des MOSFET<sup>1</sup> car ces derniers ont l'avantage d'être contrôlés en **tension**.

Ce composant possède trois broches :

- Le drain (D)
- la porte (G)<sup>2</sup>
- la source (S)

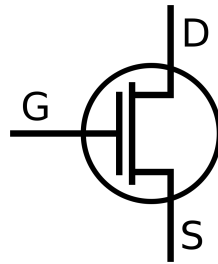


FIGURE 19.1 – La représentation du transistor MOSFET

## Conventions

Afin de simplifier les calculs par la suite, posons également les normes suivantes :

- Le courant entrant dans le Drain est appelé  $I_D$
- Le courant entrant dans la Porte est appelé  $I_G$
- Le courant sortant de la Source est appelé  $I_S$
- La tension entre la Porte et la Source est appelée  $V_{GS}$
- La tension entre le Drain et la Source est appelée  $V_{DS}$

---

1. MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor = Transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semiconducteur

2. 'G' pour Gate

## Les familles de transistors MOSFET

Les transistors MOSFET sont classés en deux catégories :

- Les transistors MOSFET à canal N<sup>3</sup>
- Les transistors MOSFET à canal P

Le principe de fonctionnement est similaire entre ces deux familles, seul le branchement et le niveau de commande diffère.

Dans ce document, nous utiliserons essentiellement des transistors MOSFET à canal N car ces derniers utilisent des grandeurs positives.

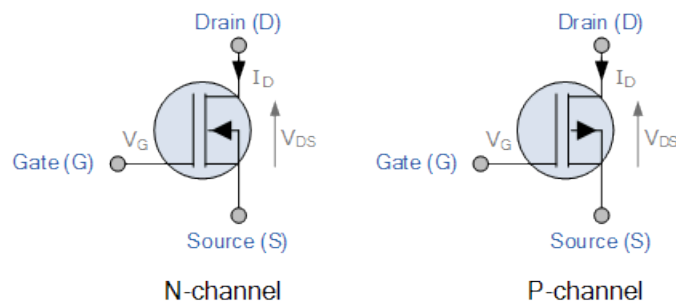


FIGURE 19.2 – Transistors à canal N et P

## Les paramètres de sélection du transistor

Les paramètres de sélection de nos transistors MOSFET sont identiques aux transistors bipolaires, c'est à dire :

- La tension admissible sur  $V_{DS}$  du transistor
- Le courant admissible entre le Drain et la Source.

Pour la suite de la présentation, on supposera que notre transistor a été dimensionné pour répondre à ces deux contraintes.

## Le principe

Ce type de transistor fonctionne comme les transistors bipolaires mais est commandé en tension et non en courant.

Par analogie, le drain joue le rôle du collecteur, la source celui de l'émetteur et la porte celui de la base. Le courant de l'élément à contrôler (moteur, résistance de puissance....) transite entre

3. Le nom de ces familles provient du type de jonction utilisé en interne. Pour plus de renseignement, consulter les diodes et semi-conducteurs

le drain et la source et la tension de commande est aux bornes de la porte.

Les transistors MOSFET deviennent passant <sup>4</sup> lorsque la tension sur la porte dépasse une tension de déclenchement appelée  $V_{GS_{th}}$ . Cette valeur est généralement comprise entre 2 et 4 Volts. <sup>5</sup>

**Lorsque cette tension  $V_{GS_{th}}$  est atteinte, notre transistor peut être remplacé d'un point de vue électrique entre le drain et la source par une résistance de très faible valeur, appelée  $R_{DS_{on}}$**

## Comparaison avec les transistors bipolaires

Par nature, la porte du MOSFET est vue comme un condensateur. Le transistor ne consomme pas de courant, excepté pendant les commutations.

Ainsi, le courant est nul dans la porte pour maintenir le moteur en marche alors que pour un bipolaire, il faut maintenir un courant dans la base.

Les MOSFET sont donc plus économes en énergie que les bipolaires. De plus, ils peuvent généralement supporter des courants plus importants que les bipolaires.

En revanche, en hautes fréquences, les MOSFET sont moins réactifs du fait de leur capacité en entrée.

## Mise en pratique

Nous souhaitons faire tourner le même moteur que celui utilisé avec notre transistor bipolaire. Nous allons le commander avec une carte Arduino.

## Branchements

Tout d'abord, il convient de placer le moteur entre notre alimentation et le drain.

### Remarque

Toutes les charges à contrôler avec ce type de transistor se placent entre l'alimentation et le drain.

Enfin, il ne nous reste plus qu'à relier une sortie numérique de l'Arduino vers notre porte **sans** résistance.

Nous obtenons donc le schéma suivant.

4. Le transistor laisse passer tout le courant autorisé.

5. Lorsque la tension  $V_{GS}$  est inférieure à  $V_{GS_{th}}$ ,  $I_D$  vaut  $K \cdot ((V_{GS} - V_{th}) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2)$   
Cette relation montre que l'étude en amplification est plus complexe car non linéaire.

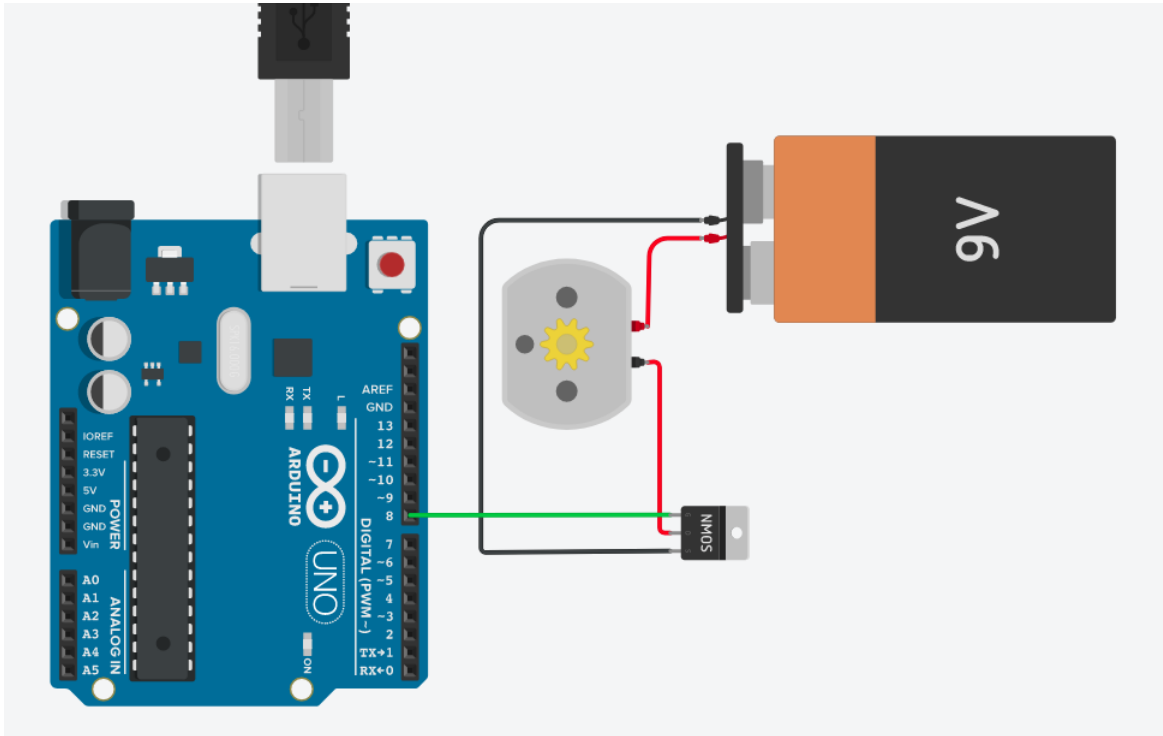


FIGURE 19.3 – Branchement du transistor MOSFET

## Exemple de programme Arduino

Voici un code permettant de faire tourner le moteur périodiquement pendant 5 secondes puis de l'arrêter pendant 5 secondes. Il s'agit du même code que pour le transistor bipolaire.

```
#define D8 8      //GATE du transistor

void setup() {

    pinMode(D8, OUTPUT); //Mise en sortie de la broche
} //End setup

void loop() {

    digitalWrite(D8, HIGH);    //déclenchement du moteur
    delay(5000);               //Délai de 5s
    digitalWrite(D8, LOW);     //arrêt du moteur
    delay(5000);               //Délai de 5s
} //End loop
```

Code Arduino avec MOSFET

## Ce qu'il faut retenir

Nous avons à notre disposition tout un ensemble de technologies pour contrôler la partie puissance.

Les transistors ne sont pas adaptés pour commuter une charge sur secteur (230V), cette partie sera donc réservée aux relais.

En revanche, pour toutes les tensions continues, les transistors sont adaptés et prennent moins de place en encombrement.

## Les fiches techniques

L'intégralité des informations disponibles pour un transistor sont disponibles dans un document complet appelé **Datasheet**.

Ce document détaille les broches, les caractéristiques électriques, propose des schémas d'exemples....

Par exemple, voici quelques extraits de la documentation du transistors IRF520<sup>1</sup> :

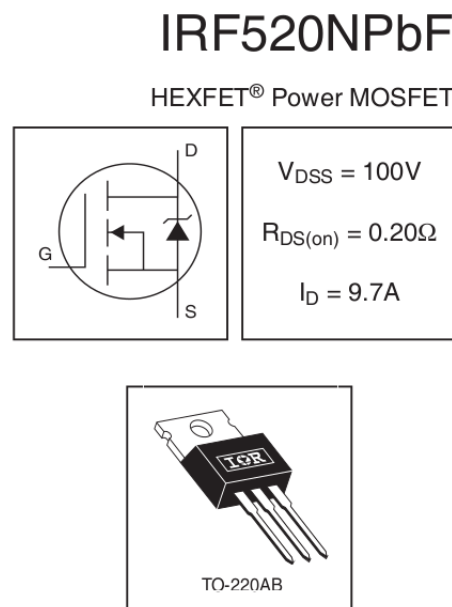


FIGURE 20.1 – Extrait n°1 du IRF520

---

1. Transistor de puissance



**Electrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)**

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.11	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}$ , $I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.20	$\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 5.7A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$

FIGURE 20.2 – Extrait n°2 du IRF520

On retrouve sur cette figure la valeur de  $R_{DS_{on}}$  et de  $V_{GS_{th}}$

# Les familles des circuits logiques

## Présentation

Les circuits logiques sont des éléments permettant de réaliser des opérations avec l'algèbre de Boole (uniquement des '0' et des '1'). Pour réaliser ces opérations (ET, NON, OU, NON-OU, NON-ET...), des circuits ont vu le jour dans les années 60 avec deux grandes familles de circuits :

- La famille TTL
- La famille CMOS

De nouvelles technologies arrivent à maturité mais nous ne les évoquons pas ici.

## Principe TTL

Les circuits TTL sont composées de transistors bipolaires NPN ou PNP. Les transistors bipolaires sont commandés en courant.

## Principe CMOS

La famille CMOS, quant à elle, repose sur l'utilisation en interne de transistors MOS complémentaires (C).

Les transistors MOS, du fait de leur structure, sont commandés en tension.

## Comment les distinguer ?

La famille des CMOS est rapidement identifiable car le nom du composant contient un numéro commençant par 40 et se termine avec un nombre à 2 ou 3 chiffres (40XX ou 40XXX).

Par exemple, CD4001, CD4017 sont des composants CMOS.

La famille des TTL contient en général le chiffre 74<sup>1</sup> encadré par des lettres et des chiffres.

## Avantages et inconvénients

- Les TTL consomment plus de courant que les CMOS<sup>2</sup>

---

1. La série militaire des TTL possède le numéro 54 et possède de meilleures caractéristiques : plage de température de fonctionnement plus élevée, fréquence plus élevée...

2. Ces derniers consomment uniquement lors des phases de commutation

- Les CMOS ont des fréquences de fonctionnement plus faibles que les TTL.

## Introduction

Un signal est une évolution d'une grandeur physique.  
Il permet donc de caractériser cette grandeur qui peut ensuite être traitée par un circuit adapté.

- Les signaux numériques
- Les signaux analogiques

## Les grandeurs physiques

Afin de mieux comprendre comment un signal peut se former, nous allons étudier les notions de tensions, de courant et de résistances électriques. Pour cela, plongeons nous dans la matière, au niveau des électrons

### Les atomes

### La charge électrique

### Les électrons

Les électrons forment la couche extérieure de l'atome, élément insécable de notre univers.  
Lorsqu'un électron se déplace dans l'espace, ce dernier engendre un courant.

*Le courant électrique est le nombre d'électrons par unité de temps*

La charge électrique représente quant à elle le nombre d'électron à un endroit donné et à un temps précis.

## La tension électrique

Nous avons vu que le courant est une nombre de charges par unité de temps.  
Comment pouvons nous engendrer ce courant ? Tout simplement en soumettant une différence de potentiel, autrement dit une **tension**

## Analogie

Afin de mieux comprendre ce principe, faisons une analogie.  
Prenons un rivière, un barrage et une montagne.

Soit deux points sur une route dont nous pouvons régler la hauteur en chaque point. On considère une goutte d'eau entre ces points.

Notre objectif est de déplacer notre goutte d'un point à l'autre.

» Comment faire ?

En surelevant le point  $A$  et en abaissant notre point  $B$ , notre goutte va descendre du point le plus élevé au plus bas.

Le courant fonctionne de la même manière :

**Il ira toujours du potentiel le plus haut au plus faible.**

Pour la petite histoire, historiquement, le sens du courant était du potentiel le plus élevé au plus faible. Bien des années plus tard, les scientifiques se sont rendu compte que le courant allait en réalité du potentiel le plus faible au plus élevé. Néanmoins, la convention a été gardée...

## Exemples

**Question 4.** Soient  $A$  et  $B$  nos deux points du circuits. Ces deux points sont soumis à une tension  $U_A$  et  $U_B$

Quel est le sens de parcours du courant (de  $A$  vers  $B$ , de  $B$  vers  $A$  ou bien autre chose) ?

$U_A$ (V)	$U_B$ (V)	Sens du courant ?
10	5	
5	10	
5	5	

FIGURE 22.1 – Question sur le sens du courant en fonction des tensions  $U_A$  et  $U_B$

## Introduction

Il existe deux grandes familles d'alimentations :

- ▶ Les alimentations linéaires
- ▶ Les alimentations à découpages

Les alimentations linéaires sont réputées pour avoir une tension stable et propre (tension continue).

Regardons de plus près le principe de ces alimentations.

## L'objectif

On souhaite transformer une tension sinusoïdale<sup>1</sup> en une tension continue, stable et régulée.

1. De valeur efficace 230V et de fréquence 50 Hz

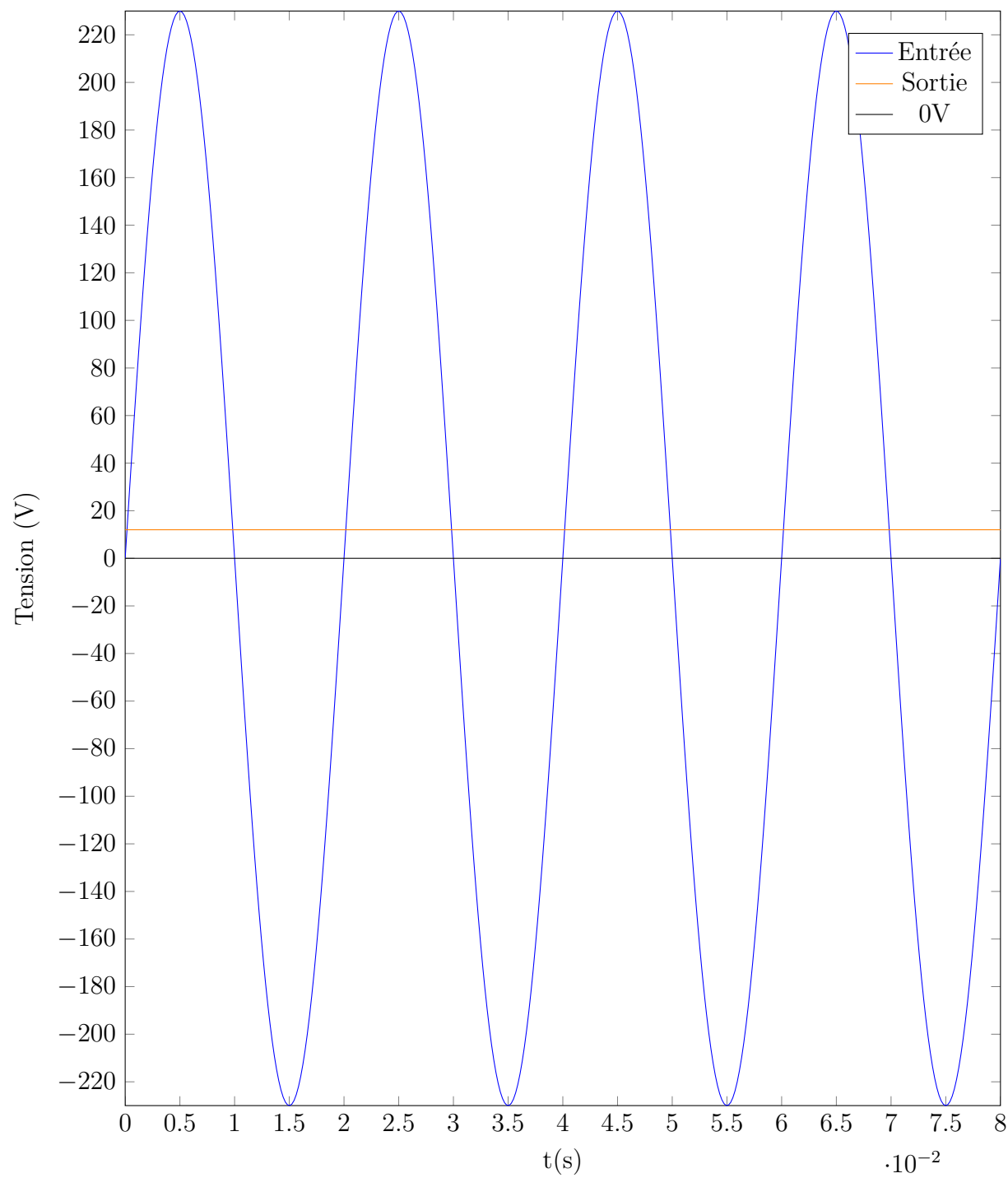


FIGURE 22.2 – Les tensions d'entrée et de sortie de notre alimentation

## Le choix du transformateur

Pour notre circuit, nous devons connaître la tension finale en sortie de notre alimentation. Au vue des composants demandés (régulateurs, pont de diode), il faudra une tension efficace de  $12V^2$  Le rapport des bobines de notre transformateur sera donc au minimum de **19**. Cela veut dire que pour 19 enroulements dans la bobine primaire, il en faudra une seule dans la bobine secondaire.

La puissance demandée pour le transformateur n'est pas critique, la puissance absorbée par le circuit en aval est négligeable.

Notre transformateur va donc abaisser la tension du secteur en une tension plus faible.

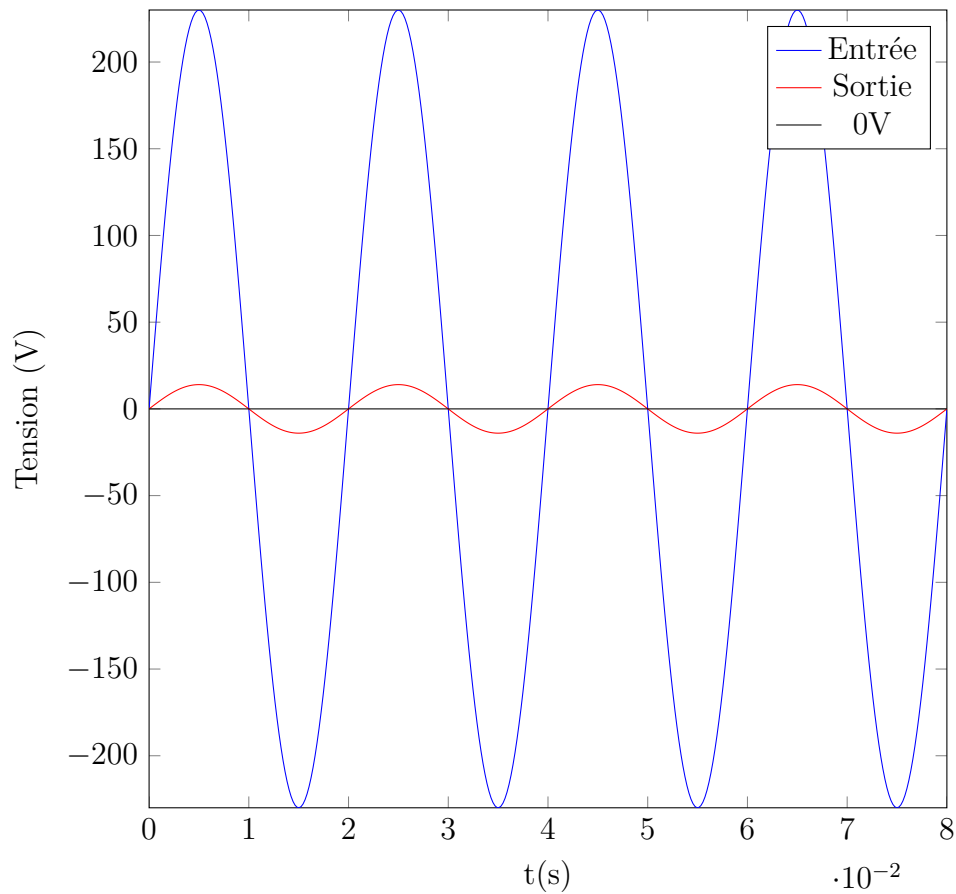


FIGURE 22.3 – Les tensions d'entrée et de sortie du transformateur

---

2. Nous verrons la justification de cette valeur par la suite.

## Le pont redresseur de tension

### Principe

Notre objectif est maintenant de supprimer la composante négative de notre signal. Pour cela, on va utiliser la propriété des diodes qui ont la faculté de laisser passer le courant dans un seul sens.

Un montage existant est le Pont de Graetz.

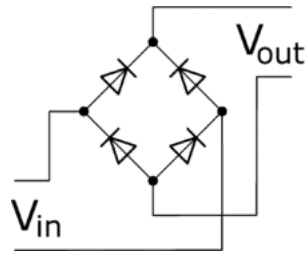


FIGURE 22.4 – Le pont de diode

Observons le résultat lorsque nous mettons notre tension de sortie du transformateur sur notre entrée de pont.

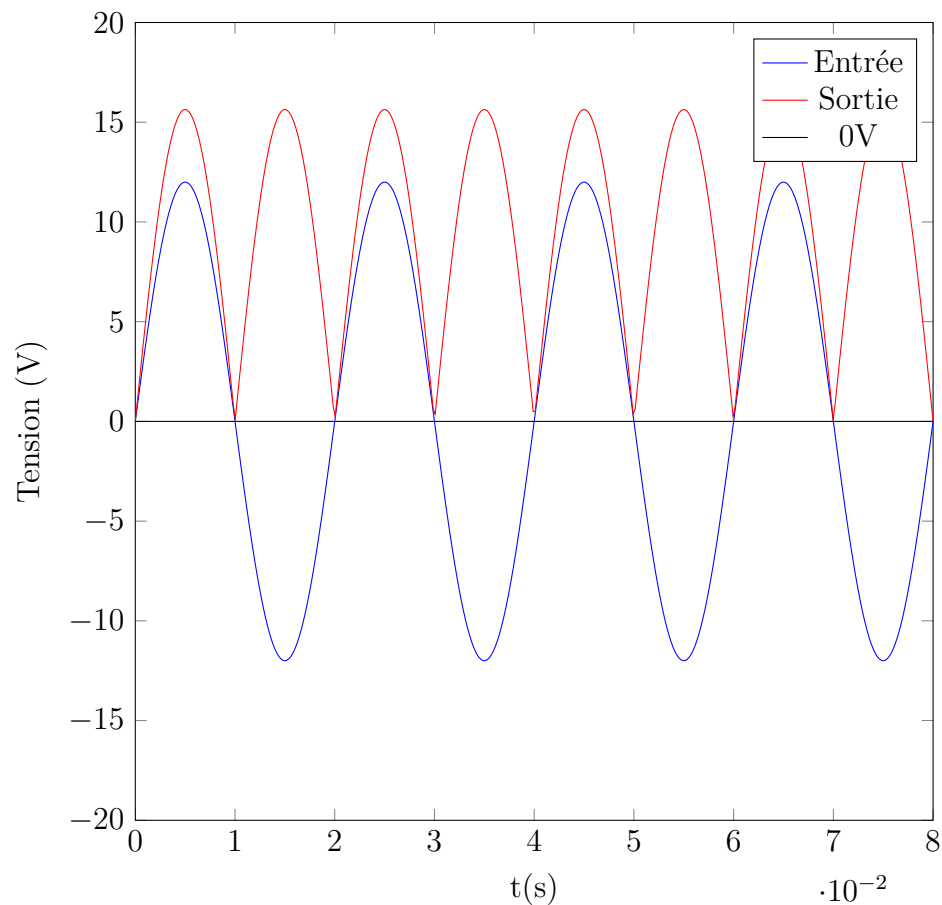




FIGURE 22.5 – Les tensions d’entrée et de sortie du pont de diode

On constate que la tension de sortie est plus élevée que notre tension d’entrée. Cette valeur s’explique par les diodes.

En sortie, nous voulons une tension de  $15V$ . Or, les  $12V$  en entrée de notre pont sont une valeur efficace, ce qui veut dire que la valeur réelle vaut  $17.04V$ . En effet :

$$V_{réelle} = V_{efficace} \cdot \sqrt{2} = 12 \cdot 1.41 = 17.04V$$

Or, à chaque changement de polarité dans notre pont (signal alternatif [positif et négatif]), le courant passe à travers deux diodes.

Chaque diode engendre une chute de tension de  $0.7V$ , d’où une perte de  $1.4V$  en sortie. Nous avons comme tension finale en sortie de pont :

$$V_s = V_{efficace} \cdot \sqrt{2} - 0.7 \cdot 2 = 12 \cdot 1.41 - 1.4 = 15.64V$$

## Un exemple de boîtier

La plupart des boîtiers possèdent 4 broches

- ▶ deux broches  $V$  pour la tension alternative
- ▶ Une broche  $V_-$  pour la masse du circuit en aval
- ▶ Une broche  $V_+$  pour la tension positive du circuit en aval

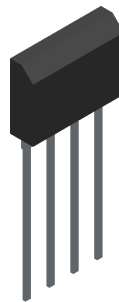


FIGURE 22.6 – Un exemple de boîtier

## Les condensateurs

### Principe

Comme vu à la section précédente, notre signal n'est pas continu et possède des oscillations élevées. Nous cherchons à produire une tension continue.

Pour cela, nous allons utiliser des condensateurs.

Leur rôle sera d'accumuler de l'énergie lorsque le signal monte en amplitude et de restituer cette énergie lorsque le signal sera sur sa phase descendante.

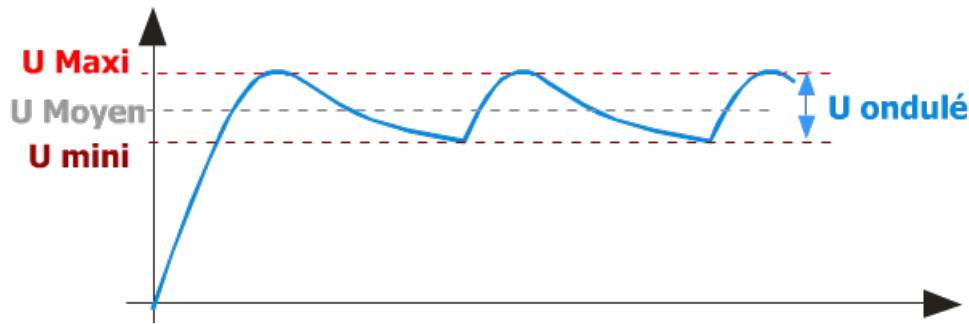


FIGURE 22.7 – Le rôle du condensateur

## Choix de la valeur

Plus la valeur du condensateur est élevée, plus notre signal sera lisse en sortie, ce qui est l'effet recherché.

En effet, la capacité du condensateur exprime la quantité d'énergie emmagasinée dans le condensateur.

Un condensateur de  $1mF$  et plus est une valeur normale.

Une fois notre tension assez propre (même si elle présente des oscillations), nous allons utiliser les régulateurs de tensions.

## Les Régulateurs de tension

### Principe et branchements

Ces composants à trois broches servent à stabiliser une tension pseudo-continue en une tension continue et stable, c'est à dire ne présentant pas d'oscillations.

Le branchement est le suivant :

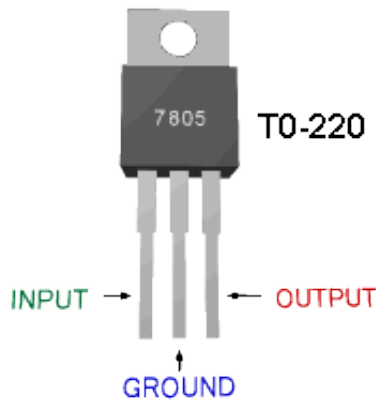


FIGURE 22.8 – Un régulateur de tension

- ▶ L'entrée INPUT est la tension à réguler
- ▶ La broche GROUND est la masse du circuit
- ▶ la sortie OUTPUT est la tension régulée (stable)

## Les familles des régulateurs

Il existe différentes familles de régulateurs linéaires, les plus connus étant les LM78XX<sup>3</sup> ou les LM317 qui sont des régulateurs de tension réglables.

Pour des tensions négatives, se référer à la famille des LM79XX.

Pour que ces composants fonctionnent correctement, il convient de leur mettre en entrée une tension supérieure à leur tension de régulation.

Concrètement, si on utilise un LM7812 (régulateur 12 V), il faudra mettre en entrée au moins 15 V pour que le composant fonctionne dans la plage idéale.

### Cette tension de 15V justifie la valeur de tension du transformateur.

Ces composants sont linéaires, c'est à dire que la différence de tension entre l'entrée et la sortie ( $V_e - V_s$ ) engendre une perte de puissance dans le système.

Cette perte dépend directement du courant absorbé par le circuit en aval mais également de la différence de tension ( $V_e - V_s$ ).

Cette puissance vaut :

$$P_{perdue} = (V_e - V_s) \cdot I_{charge} \quad (W)$$

## Un exemple

On souhaite réguler un circuit en 12V, ce dernier consommant 150 mA ( $I_{charge}$ ).

---

3. XX prend la tension régulée de sortie (5,9,12,15,18V...)

La perte d'énergie vaut

$$P_{perdue} = (V_e - V_s) \cdot I_{charge} = (15 - 12) \cdot 0.150 = 0.45W$$

## Quelques fournisseurs de composants et matériels

Voici ma liste des fournisseurs.

- **Reichelt**

Cet site possède un choix très élevé de circuits intégrés (Amplificateurs opérationnels, transistors...) mais également de diodes, de leds, résistances.

La documentation est bien fournie.

Vente d'outils pour l'électronique.

Le site est disponible à l'adresse <https://www.reichelt.com/>

- **Gotronic**

Cet site possède un choix très élevé de capteurs.

La documentation est bien fournie.

Vente d'outils pour l'électronique.

Délais de livraison rapides.

Le site est disponible à l'adresse <https://www.gotronic.fr/>

- **Conrad**

Similaire à Gotronic.

La documentation est bien fournie.

Vente d'outils pour l'électronique.

Le site est disponible à l'adresse <https://www.conrad.fr/>

- **Semageek**

Similaire à Gotronic.

Vente d'outils pour l'électronique.

Le site est disponible à l'adresse <https://boutique.semageek.com/fr/>

- **Dfrobot**

Un large choix de capteur pour l'embarqué.

La documentation est bien fournie, cependant certains prix sont parfois un peu excessifs.

Le site est disponible à l'adresse <https://www.dfrobot.com/>

- Puis **Banggoods** pour les petites bricoles pas chères...

Le site est disponible à l'adresse <https://www.banggood.com/>

Délai de livraison au maximum de 3 semaines.