



# Ateliers CREPP

Les condensateurs

Nicolas Le Guerroué

6 février 2022  
24 pages

TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Préambule</b>	<b>3</b>
<b>I</b>	<b>Les condensateurs</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Histoire</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Principe de fonctionnement</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Les différentes technologies</b>	<b>9</b>
4.1	Les condensateurs à film . . . . .	10
4.2	Les condensateurs à céramique . . . . .	11
4.3	Les condensateurs électrolytiques . . . . .	12
4.4	Les condensateurs variables . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Domaines d'application</b>	<b>14</b>
5.1	Les condensateurs de filtrage . . . . .	14
5.2	Les condensateurs de découplage . . . . .	16
5.3	Les condensateurs de liaison . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Avenir du condensateur</b>	<b>23</b>
6.1	Les supercondensateurs . . . . .	23

## SECTION 1

## PRÉAMBULE

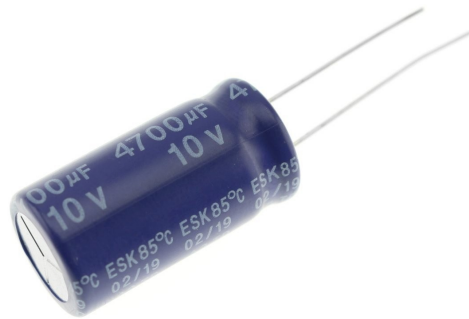
- ▶ Document réalisé en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X par Nicolas Le Guerroué pour le Club de Robotique et d'Electronique Programmable de Ploemeur (CREPP)
- ▶ Permission vous est donnée de copier, distribuer et/ou modifier ce document sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.
- ▶ Version du 6 février 2022
- ▶ Taille de police : 11pt
- ☎ 06.20.88.75.12
- ✉ [nicolasleguerroue@gmail.com](mailto:nicolasleguerroue@gmail.com)
- ▶ **Dans la mesure du possible, évitez d'imprimer ce document si ce n'est pas nécessaire. Il est optimisé pour une visualisation sur un ordinateur et contient beaucoup d'images.**

**Versions**

<b>octobre 2021</b>	Fusion des supports d'ateliers
<b>novembre 2021</b>	Ajout de l'atelier sur les servomoteurs
<b>décembre 2021</b>	Ajout de l'atelier sur les moteurs pas-à-pas
<b>janvier 2022</b>	Ajout de l'annexe pour l'installation des bibliothèques ESP8266
<b>février 2022</b>	Ajout de l'annexe pour le serveur Web ESP8266 NodeMCU

# Première partie

## Les condensateurs



Théorie sur les condensateurs et applications

## SECTION 2

## HISTOIRE

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.

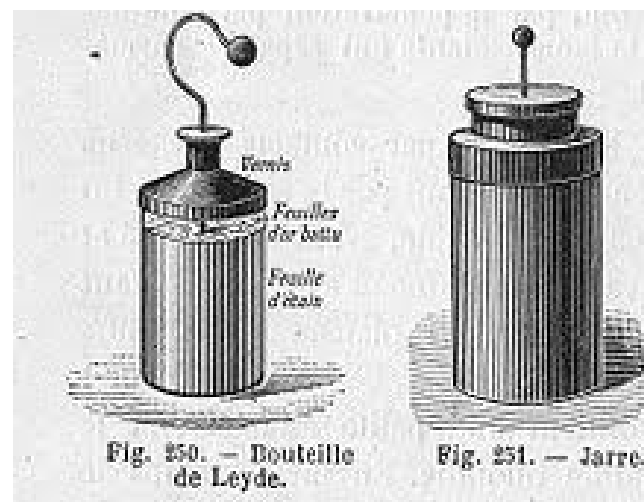


FIGURE 2.1 – Bouteille de Leyde

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



FIGURE 2.2 – Différents types de condensateurs

## SECTION 3

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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

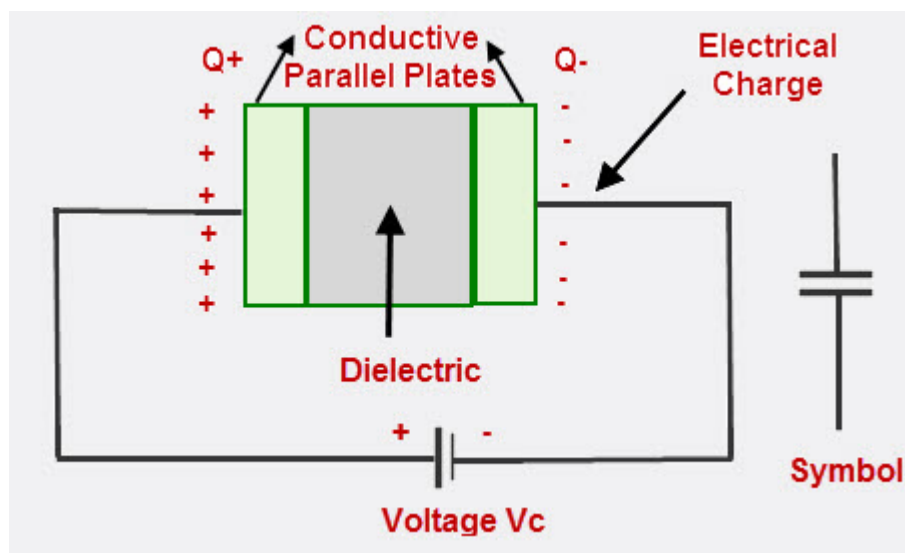


FIGURE 3.1 – schéma condensateur

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 supérieure 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.  $\epsilon_r$  représente la permittivité relative de l'isolant.

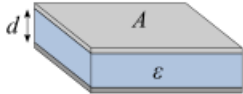
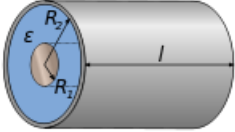
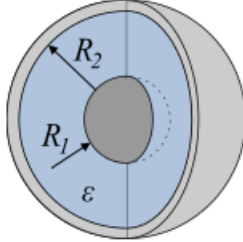
Désignation	Capacité	Champ électrique	Représentation
Condensateur plan	$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$	$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r A}$	
Condensateur cylindrique	$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$	$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \epsilon_0 \epsilon_r}$	
Condensateur sphérique	$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$	$E(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0 \epsilon_r}$	
Sphère	$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R_1$		

FIGURE 3.2 – calcul capacité



## SECTION 4

## 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.

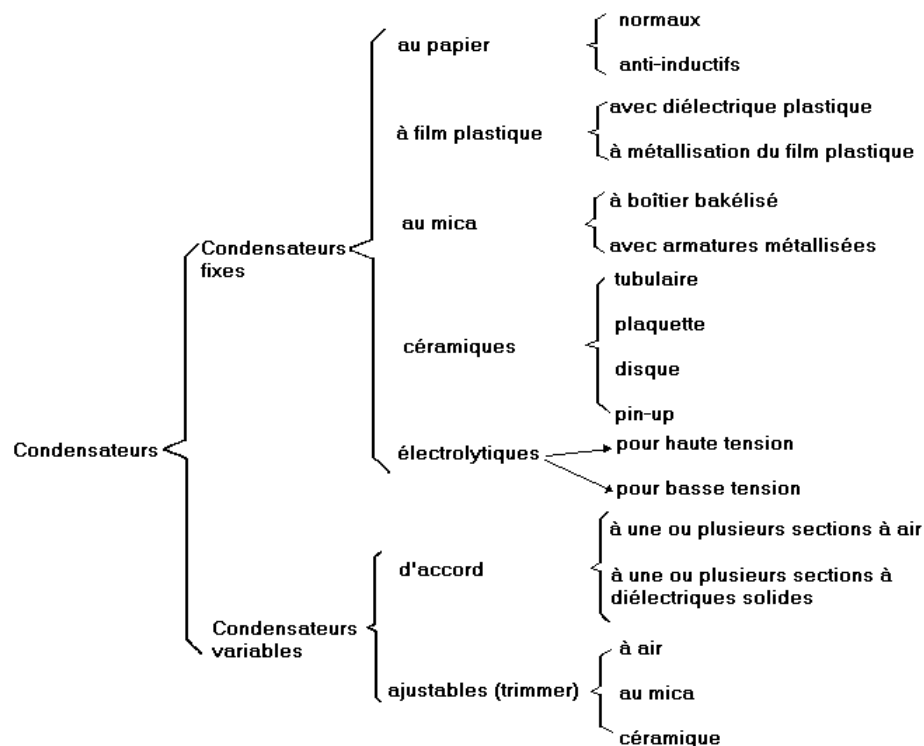


FIGURE 4.1 – Classification des différents types de condensateur

La figure 4.1 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.

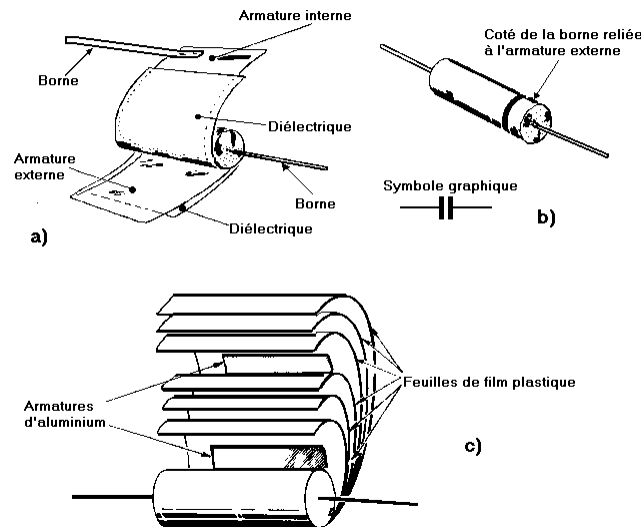


FIGURE 4.2 – Schéma interne d'un condensateur à film plastique

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 polarisés. 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.

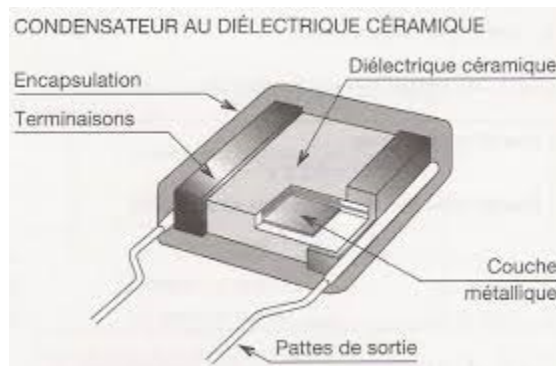


FIGURE 4.3 – Schéma interne d'un condensateur à céramique

## 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).

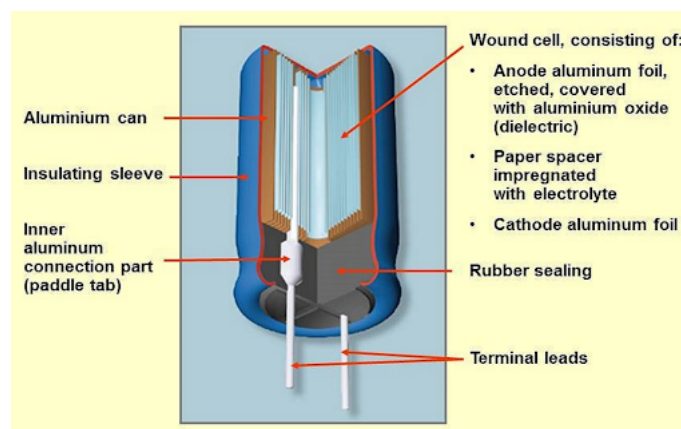


FIGURE 4.4 – Schéma interne d'un condensateur électrolytiques

## 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.

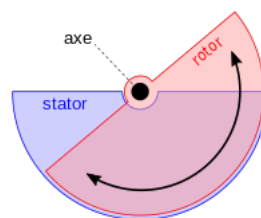


FIGURE 4.5 – Schéma interne d'un condensateur variable

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 :

$$C = f(\theta) \quad (4.1)$$

$f()$  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.

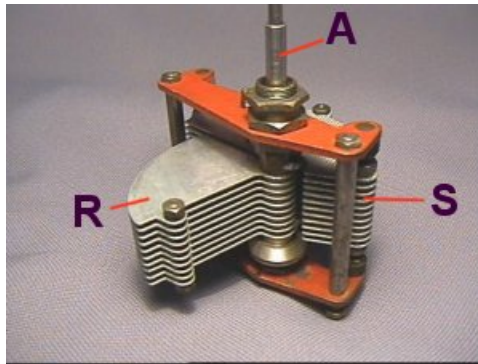


FIGURE 4.6 – Condensateur à capacité variable

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.

## SECTION 5

## DOMAINES D'APPLICATION

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.

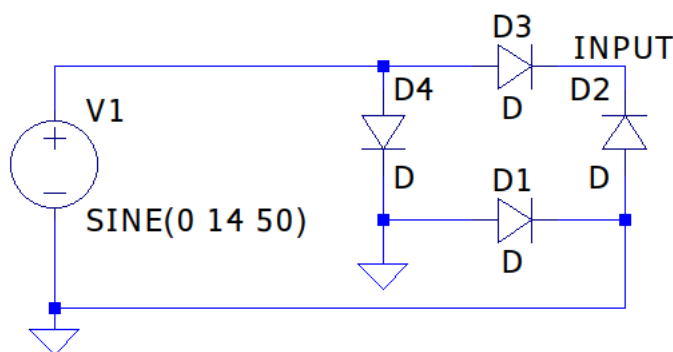


FIGURE 5.1 – Le pont de Graetz

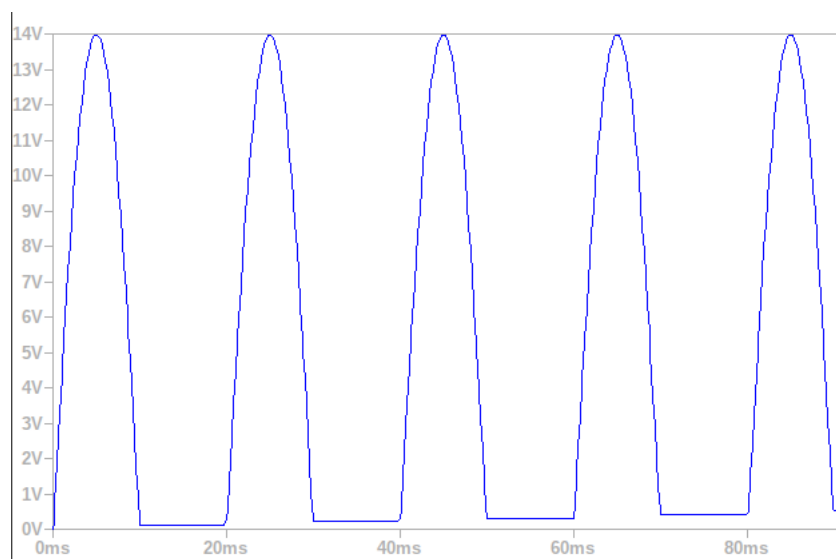


FIGURE 5.2 – La tension en sortie du pont

### 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.

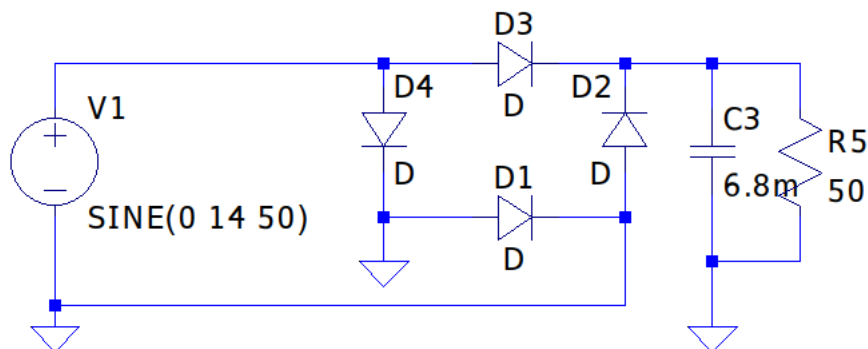


FIGURE 5.3 – Le circuit de filtrage

Observons le résultat.

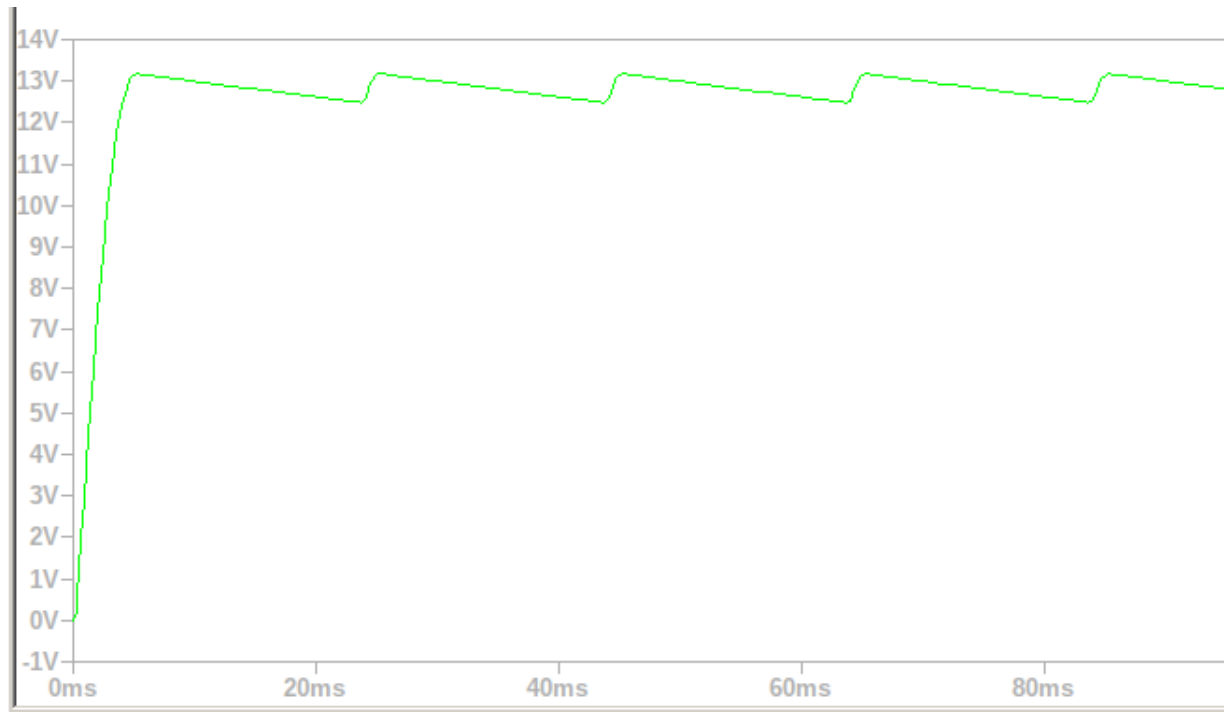


FIGURE 5.4 – La tension aux bornes du condensateur

### 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.

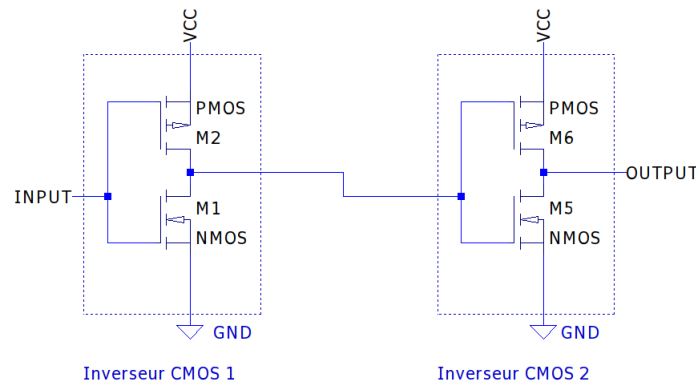


FIGURE 5.5 – Schéma d'exploitation

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.

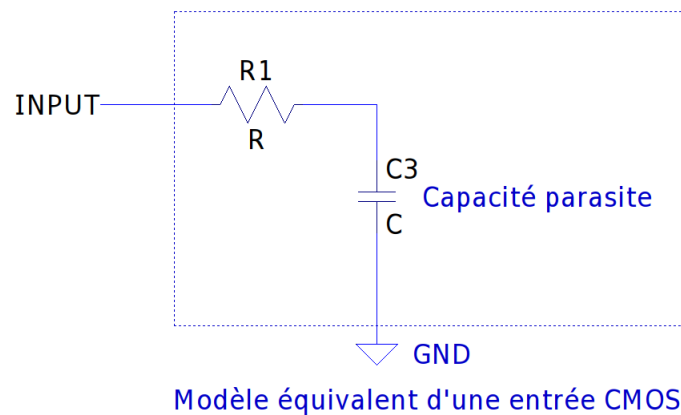


FIGURE 5.6 – Modèle équivalent des entrées CMOS

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

## 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.

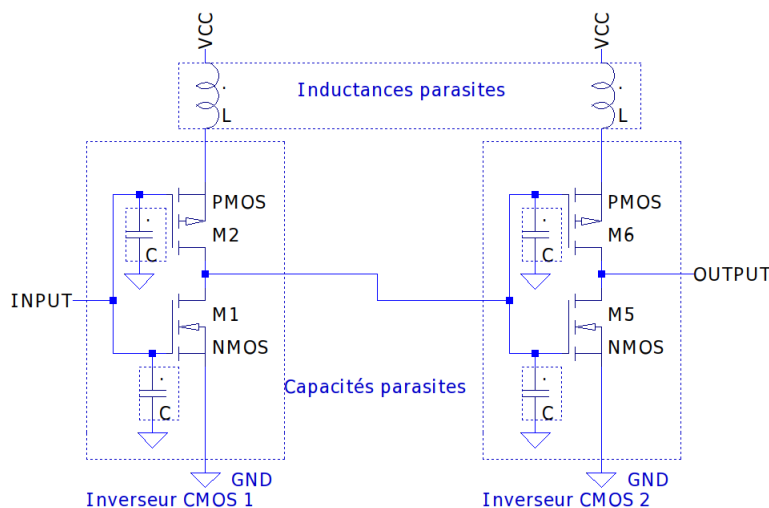


FIGURE 5.7 – Modèle équivalent du circuit

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.

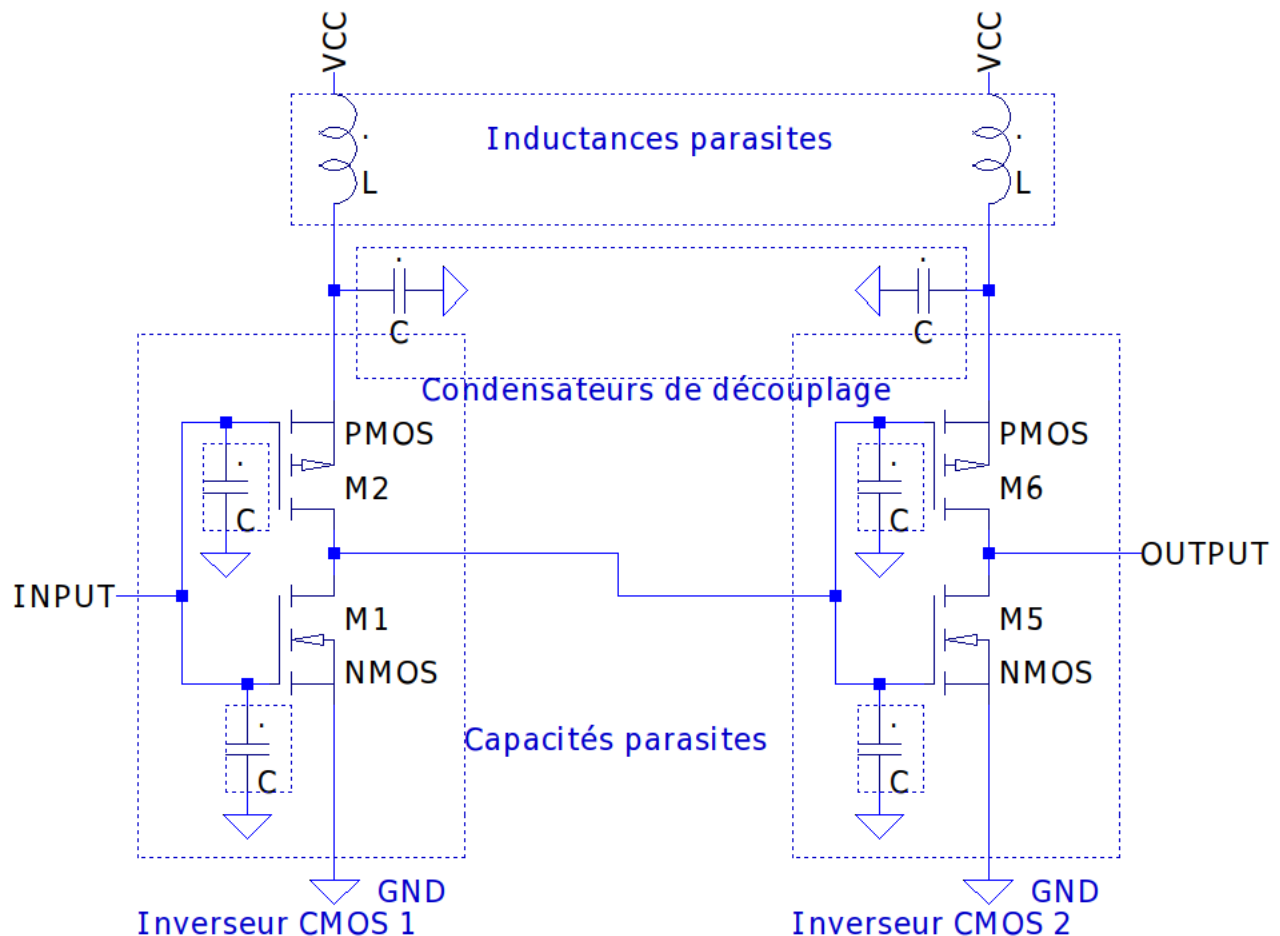


FIGURE 5.8 – Le placement du condensateur de découplage

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).

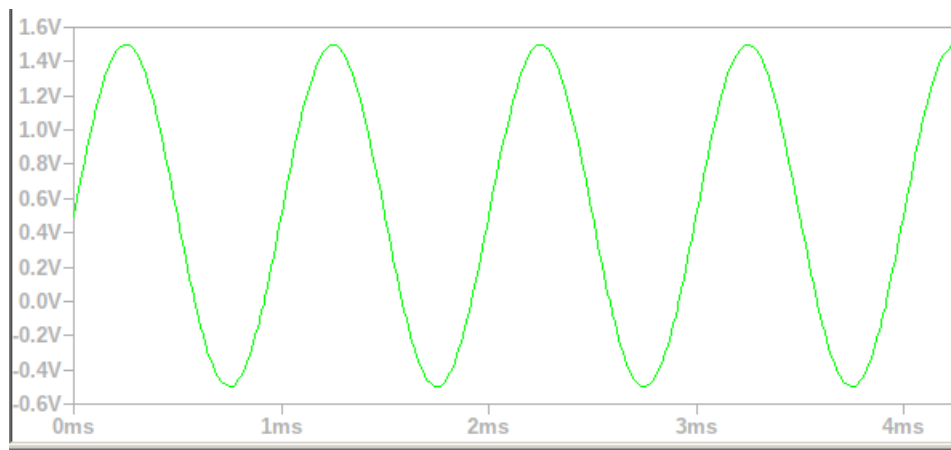


FIGURE 5.9 – Le signal à amplifier

### 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.

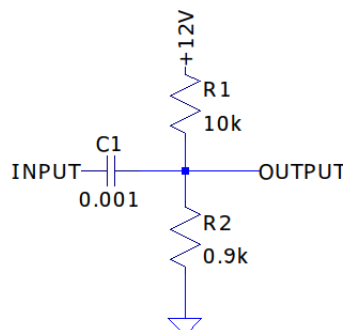


FIGURE 5.10 – Montage pour recentrer la tension

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.

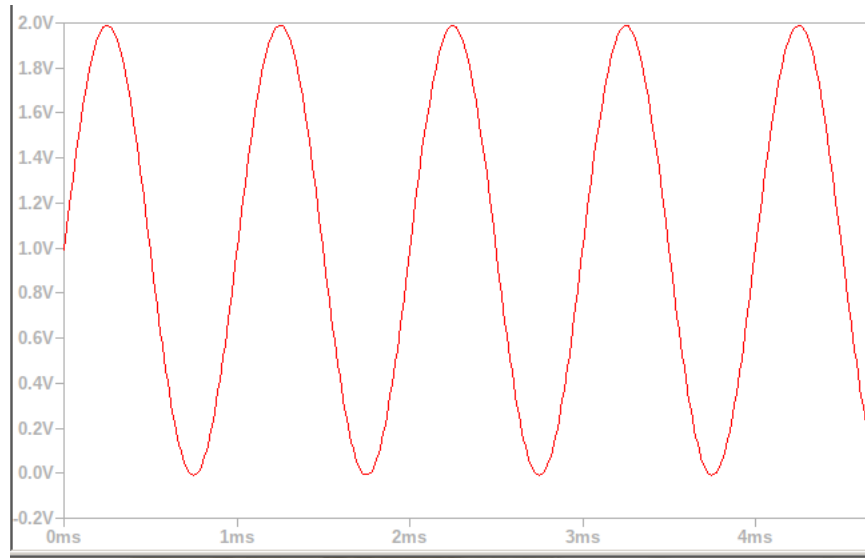


FIGURE 5.11 – Tension positive

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

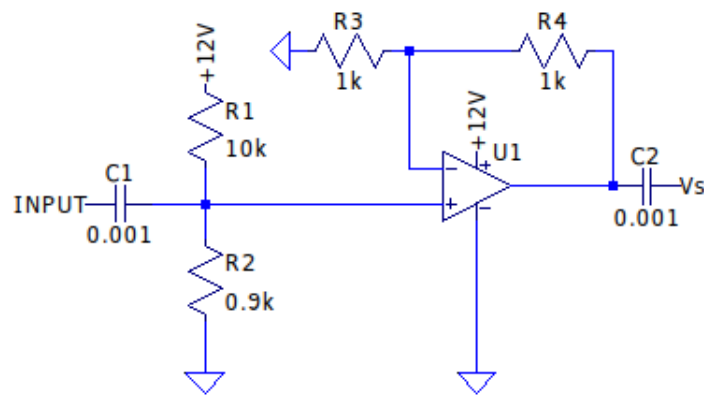


FIGURE 5.12 – Schéma avec les deux condensateurs de liaison

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.

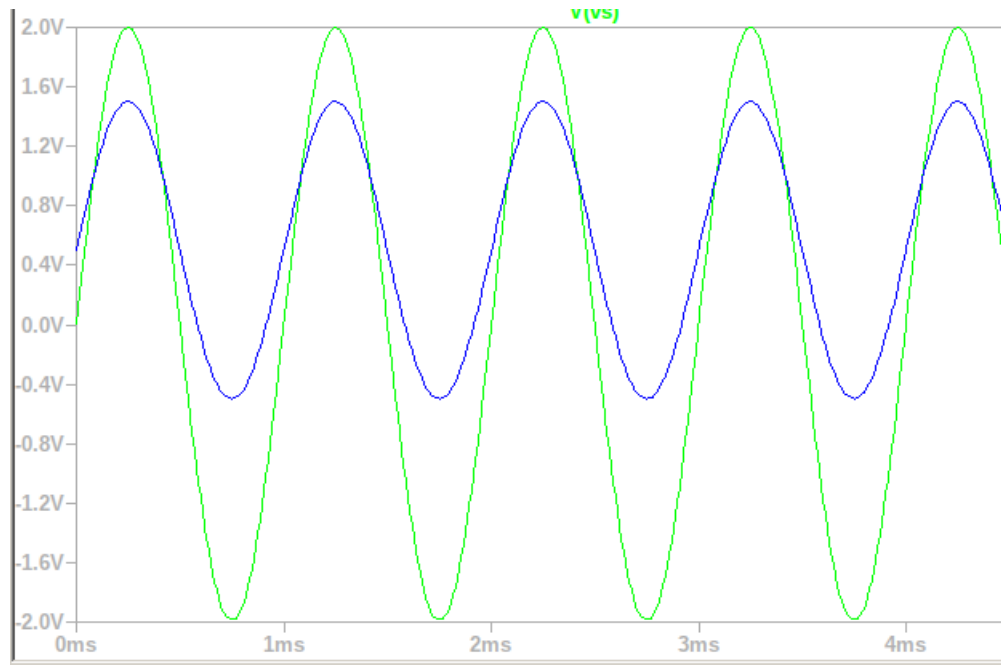


FIGURE 5.13 – La tension de sortie

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**

## SECTION 6

## AVENIR DU CONDENSATEUR

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.