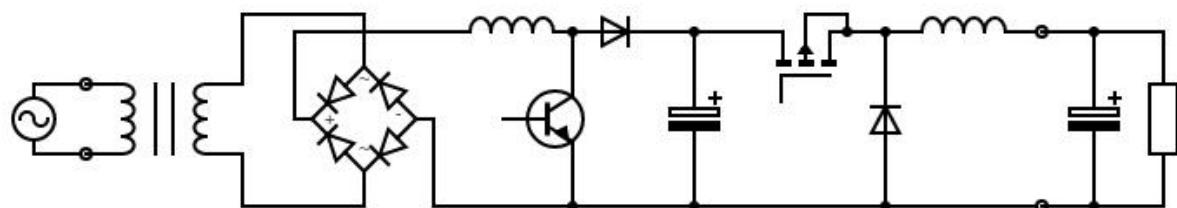


Conversion et Transport de l'Électricité

TP Redresseur



Contacts

Dimitri Boudier – Course referent. Lectures, labs.

dimitri.boudier@ensicaen.fr

Matthieu Denoual – Labs.

matthieu.denoual@ensicaen.fr

Resources

All resources are available on the course Moodle page :

<https://foad.ensicaen.fr/course/view.php?id=122>

License



Except where otherwise noted, this work is licensed under
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

TP Redresseur

Conversion et Traitement de l'Énergie - 2A GeNE

1 Introduction

1.1 Contexte

Là où le transport de l'énergie électrique se fait sous forme de tension alternative (AC, monophasée ou polyphasée), de nombreux circuits nécessitent une tension continue (DC) pour fonctionner. Ainsi il est nécessaire de disposer d'une *fonction convertisseur AC/DC* cherchant à générer une tension continue à partir d'une tension alternative. En électronique de puissance cette *fonction convertisseur AC/DC* est généralement réalisée par un *montage redresseur*.

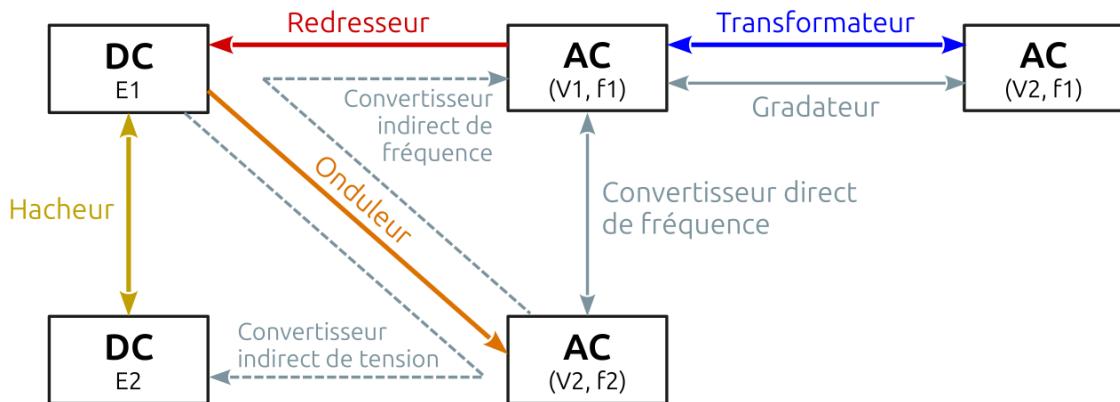


FIGURE 1 – Fonctions de conversion de l'énergie électrique.

1.2 Objectifs

Dans le cadre de ce sujet de Travaux Pratiques nous aborderons le *redresseur double alternance non-commandé*, plus communément appelé *pont de Graetz*. Vous aurez la possibilité d'explorer les versions monophasée et triphasée de ce redresseur¹.

Pour étudier ce montage vous réaliserez des simulations se font avec le logiciel LTspice, les fichiers de simulation se trouvent sur la page Moodle du cours. Vous réaliserez également des expérimentations avec le matériel présenté sur la page suivante.

1. Il existe de nombreuses autres variantes du redresseur (simple alternance, commandé, ...), que nous ne traiterons pas dans ce sujet.

1.3 Matériel pour l'expérimentation

Pour réaliser la partie expérimentation, vous avez accès au matériel suivant :

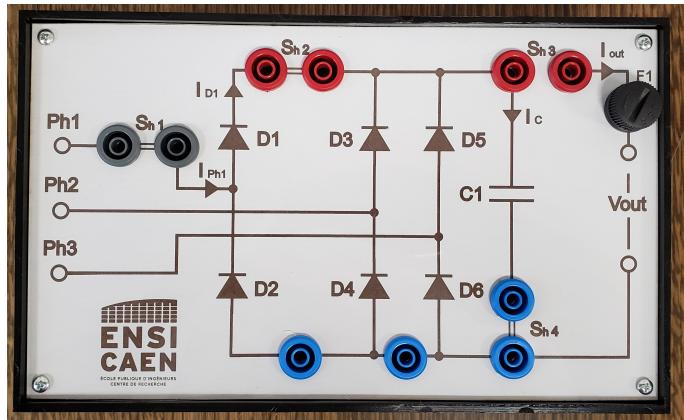
- 1 × maquette « Redresseur »ENSICAEN (Figure 2) ;
- 1 × générateur triphasé Pierron GENETRI ($3 \times 12 \text{ V} / 2 \text{ A}$) ;
- 1 × rhéostat (résistance ajustable de puissance) et jeu de résistances de puissance ;
- 2 × sonde différentielle PINTEK DP-25 ;
- 1 × oscilloscope numérique ;
- 1 × multimètre numérique ;
- 1 × générateur triphasé ;
- des câbles bananes.

La maquette du TP redresseur est équipée de résistances de shunt de 1Ω . Celles-ci (**Sh1**, **Sh2** et **Sh3**) sont symbolisées par un trait double (=) et permettent d'obtenir une image du courant en mesurant la tension à leurs bornes. Hormis lors des mesures, ces résistances de shunt doivent être court-circuitées par un câble ou un cavalier.

Un autre cavalier pourra être placé à l'emplacement **J1** pour connecter le condensateur de lissage au reste du montage.



(a) Entrée AC.



(b) Façade.



(c) Sortie DC.

FIGURE 2 – Maquette du TP redresseur.

⚠️ Attention aux mesures

Pour toute mesure non référencée à la masse de l'oscilloscope (c'est à dire pour toutes les mesures de ce TP), l'utilisation d'une sonde différentielle est un impératif pour mesurer une différence de potentiels. Considérez donc que chaque tension visualisée sur l'oscilloscope doit passer par ces sondes différentielles (pensez à ajuster le coefficient de sonde sur l'oscilloscope).

2 Redresseur monophasé, charge résistive

Commençons par aborder la version la plus simple du redresseur : un pont de diodes autrement appelé *pont de Graetz*.

2.1 Simulation

Le fichier de simulation LTspice `tp_redresseur_monophase.asc` contient le montage d'un redresseur monophasé double-alternance non-commandé (Figure 3).

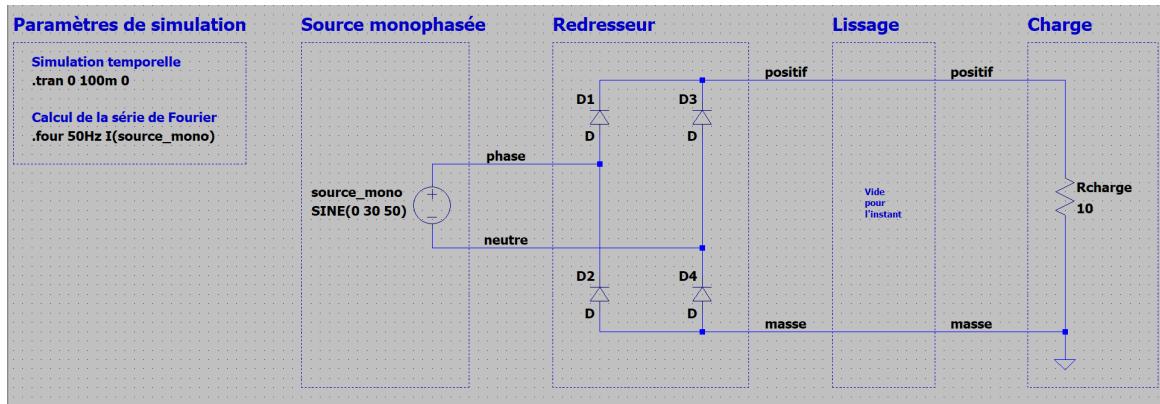


FIGURE 3 – Schéma de simulation du redresseur à pont de Graetz.

La source de tension monophasée est modélisée par l'élément `source_mono`, de fréquence 50 Hz et d'amplitude 17 V ($\simeq 12 \times \sqrt{2}$). Les diodes **D1** à **D4** sont modélisées par le modèle par défaut de LTspice, tandis que la charge est modélisée par une simple résistance `Rcharge` de 150Ω .

Tous les paramètres de la simulation sont indiqués dans l'encadré de gauche : la simulation est paramétrée dans le domaine temporel (*transient*) sur une durée de 100 ms (soit cinq périodes de la source monophasée à 50 Hz).

Analyse dans le domaine temporel

Procédons à la simulation de ce montage dans le domaine temporel.

☞ Lancez la simulation et relevez la tension aux bornes de la source de tension ainsi qu'aux bornes de la charge. Ajoutez une seconde fenêtre au chronogramme², et visualisez les courants circulant dans la source de tension, dans la charge et au moins dans une des diodes.

i Relevé de tension

Pour rappel sous LTspice, cliquer sur un fil avec la sonde permet d'observer un potentiel référencé par rapport à la masse. Pour observer une tension, c'est à dire une différence de potentiels, maintenez le bouton de souris enfoncé pour sélectionner les deux potentiels d'intérêt.

✎ Reportez résultats de la simulation sur les chronogrammes page suivante.

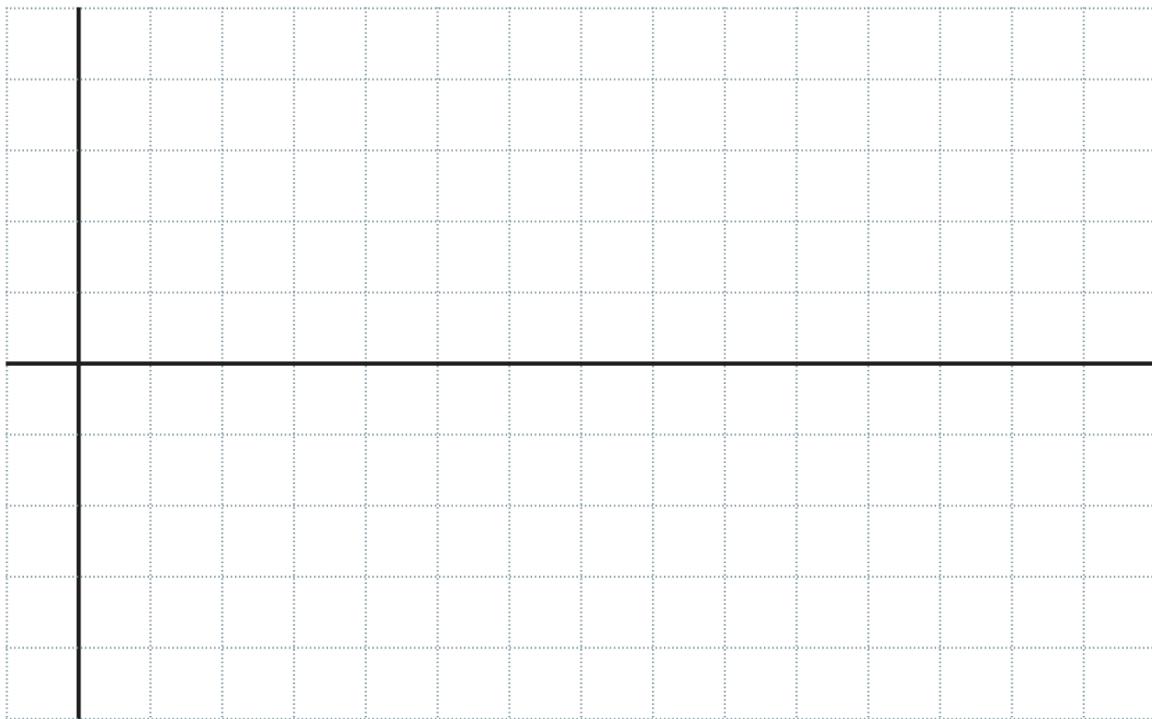
► Expliquez ces deux chronogrammes, en indiquant notamment les intervalles de conductions des diodes. Expliquez notamment la différence d'amplitude des tensions en entrée et en sortie, ainsi que le comportement du circuit aux niveaux des passages par 0 V. Sur LTspice, n'hésitez pas à changer la fenêtre d'observation pour appuyer vos explications.

✎ Donnez l'expression de la valeur moyenne de tension de sortie du redresseur $\langle v_{out}(t) \rangle$, pour une tension d'entrée exprimée par $v_{mono}(t) = V_{eff} \times \sqrt{2} \times \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$.

☞ Relevez la valeur moyenne de tension de sortie du redresseur sur le chronogramme de LTspice³ et comparez avec votre réponse précédente.

2. Clic-droit sur le chronogramme, puis **Add Plot Pane Below**.

3. Pour obtenir les valeurs moyenne et efficace d'un relevé sur LTspice, effectuez un **Ctrl** + **Clic** sur le nom du signal.



Bilan énergétique

Maintenant que nous avons compris le fonctionnement du montage redresseur, il convient de faire un bilan énergétique de celui-ci. Avec LTspice il n'est pas possible d'avoir de mesure directe des puissances. Toutefois nous pouvons les déterminer par des mesures indirectes.

La **puissance active** P désigne la puissance électrique réellement consommée. En régime sinusoïdal de tension et de courant, elle s'exprime par $P = \langle p(t) \rangle = \langle v(t) \times i(t) \rangle = V_{eff} \times I_{eff} \times \cos(\varphi)$.

 Sur LTspice, tracez les chronogrammes correspondant aux puissances instantanées $p_{mono}(t)$ (fournie par la source de tension monophasée) et $p_{out}(t)$ (consommée par la charge **Rcharge**).

 Relevez les valeurs moyennes de ces deux courbes, et déduisez-en P_{mono} , P_{out} et le rendement $\eta = P_{out}/P_{mono}$ du montage redresseur.



À quoi sont dues les pertes ? Confirmez par un relevé adéquat sur la simulation LTspice.

La **puissance réactive** Q désigne la puissance électrique échangée mais non consommée. En régime sinusoïdal de tension et de courant elle s'exprime par la relation $Q = V_{eff} \times I_{eff} \times \sin(\varphi)$. Elle n'est pas directement exploitable via LTspice, passons donc à la troisième grandeur de puissance.

La **puissance apparente** S désigne la puissance électrique transportée, résultant de la puissance active P et de la puissance réactive Q . En régime sinusoïdal de tension et de courant elle s'exprime par la relation $S = V_{eff} \times I_{eff} = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

 Relevez les valeurs efficaces de tensions et de courants de sorte à obtenir la puissance S_{mono} transportée par la source de tension.



Déduisez-en la valeur de puissance réactive Q_{mono} échangée en entrée du circuit.



Donnez le facteur de puissance du montage redresseur, sachant que $f_p = P/S = \cos(\varphi)$.

2.2 Expérimentation

À l'aide de l'ensemble du matériel proposé (voir section « [1.3. Matériel pour l'expérimentation](#) » page [4](#)), nous allons tenter d'obtenir des résultats par la mesure.

Mise en marche du circuit

 Réalisez le montage présenté ci-dessous (Figure 4). Demandez validation auprès de l'enseignant avant de poursuivre.

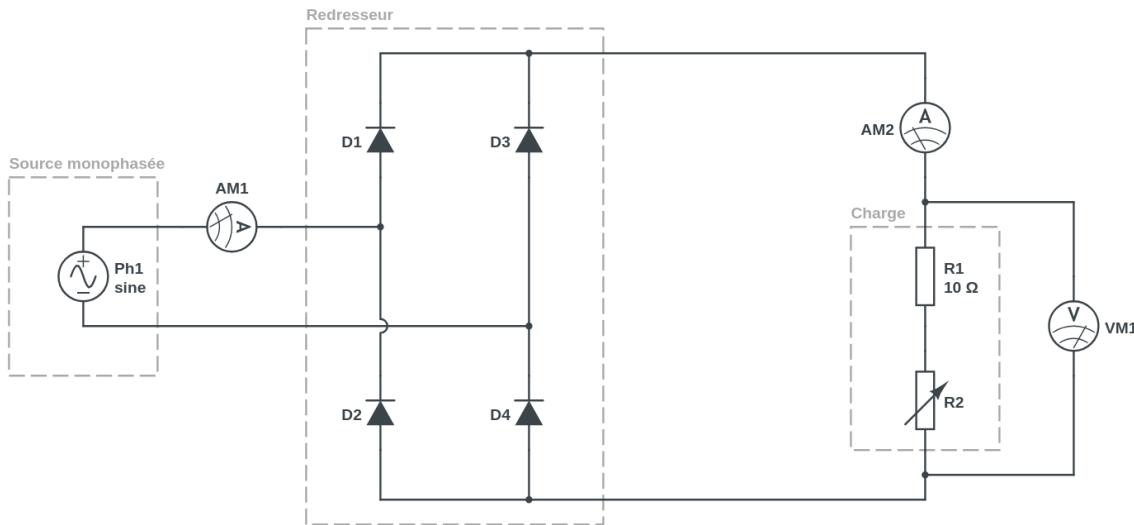


FIGURE 4 – Schéma expérimental du redresseur à pont de Graetz.

 Réglez le rhéostat de sorte à obtenir $I_{eff,mono} \simeq 71.1mA$ (mêmes conditions que dans la simulation LTspice).

 À l'aide des sondes différentielles, visualisez sur oscilloscope les signaux $v_{mono}(t)$ et $v_{out}(t)$ et confirmez que vous retrouvez le fonctionnement prévu par la simulation.

Bilan énergétique

De la même manière que pour la simulation, nous allons relever les différentes puissances du montage pour réaliser une étude énergétique du redresseur.

 Visualisez sur oscilloscope les grandeurs $v_{mono}(t)$, $i_{mono}(t)$ et $p_{mono}(t)$ en entrée du montage redresseur.

 En déduire la valeur de la puissance active P_{mono} fournie par la source de tension.

 Relevez les valeurs efficaces $V_{eff,mono}$ et $I_{eff,mono}$. En déduire la valeur de la puissance apparente S_{mono} fournie par la source de tension.

 Déduisez-en le facteur de puissance f_p vu par le réseau électrique.

 Visualisez sur oscilloscope les grandeurs $v_{out}(t)$, $i_{out}(t)$ et $p_{out}(t)$ en sortie du montage.

 Relevez ainsi la valeur de la puissance moyenne P_{out} consommée par la charge.

 Déduisez-en le rendement η du montage redresseur.

Synthèse sur le pont de diodes

Le pont de diode complet est un montage qui possède peu de pertes en forte puissance et dont le facteur de puissance f_p est quasiment unitaire. Du point de vue du fournisseur d'électricité, ce montage correspond à une charge parfaite. Toutefois la tension en sortie est loin d'être continue. Nous verrons dans le prochain chapitre comment nous rapprocher d'une tension constante.

3 Redresseur monophasé avec condensateur de lissage

Nous avons vu que le principal défaut du pont de Graetz est que la tension de sortie, bien que positive, n'est pas constante. Nous allons donc ajouter un condensateur en sortie du montage de sorte à lisser la tension. C'est ce qu'on appelle *montage redresseur avec capa en tête*.

3.1 Simulation

 Sur le fichier de simulation LTspice `tp_redresseur_monophase.asc`, ajoutez un condensateur dans l'encadré prévu à cet effet. Vous lui donnerez une valeur de capacité de $2200 \mu\text{F}$. Le reste des paramètres reste inchangé.

Analyse dans le domaine temporel

Procédons à la simulation de ce montage dans le domaine temporel.

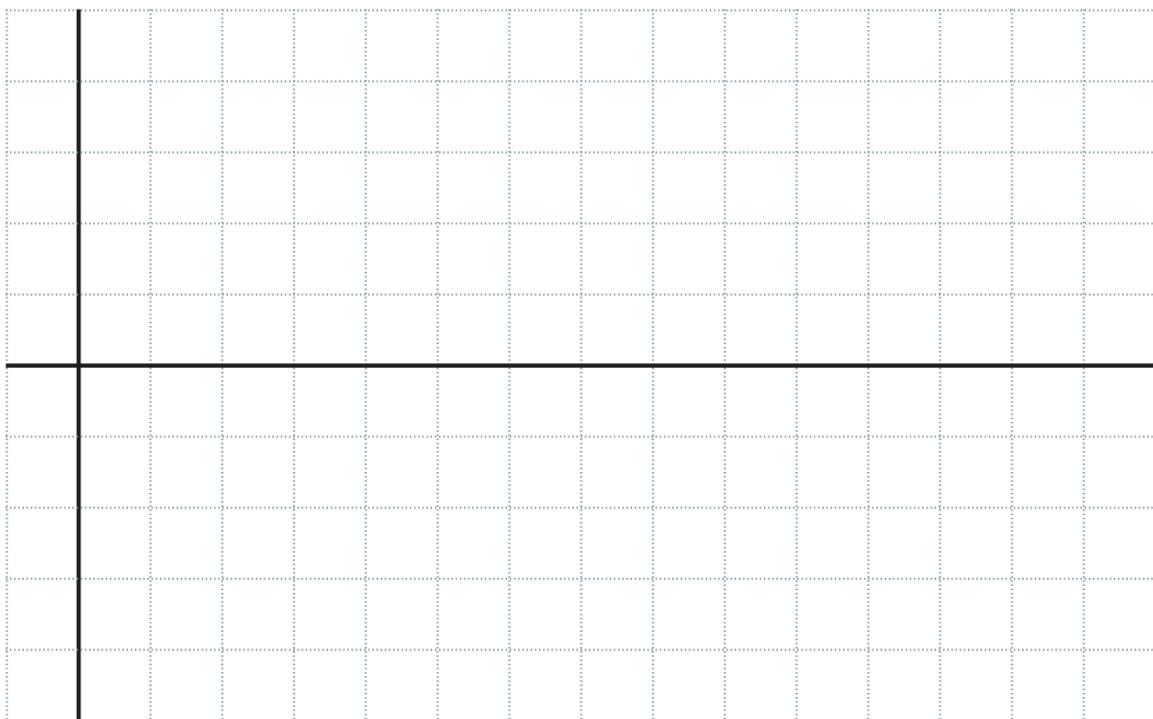
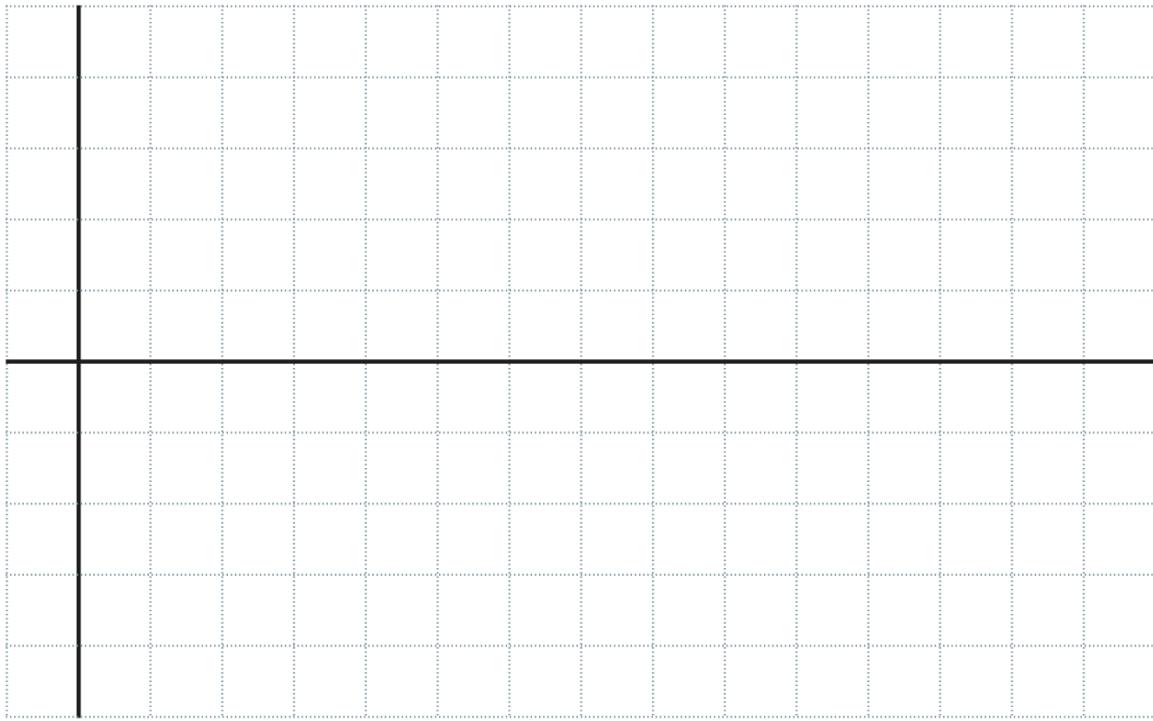
 Lancez la simulation et relevez la tension aux bornes de la source de tension ainsi qu'aux bornes de la charge. Ajoutez une seconde fenêtre au chronogramme, et visualisez les courants circulant dans la source de tension, dans la charge, dans le condensateur et au moins dans une des diodes.

 Reportez résultats de la simulation sur les chronogrammes page suivante.

 Expliquez ces deux chronogrammes, en indiquant notamment les intervalles de conductions des diodes et le rôle du condensateur. Sur LTspice, n'hésitez pas à changer la fenêtre d'observation et/ou la valeur de capacité pour appuyer vos explications (attention à bien revenir à $2200 \mu\text{F}$ pour la suite).

 En considérant une décharge linéaire du condensateur **C1** dans la charge **Rcharge** sur une demi-période (i.e. sur la durée d'une alternance), donnez l'expression de l'ondulation de tension ΔV_{charge} aux bornes de la charge en fonction de C , f , et I_{charge} (supposé constant).

 Relevez par graphique la valeur ΔV_{charge} de votre simulation. Vérifiez que l'ordre de grandeur est cohérent.



Bilan énergétique

Dans un montage redresseur avec capacité en tête, la tension de sortie est quasiment continue. Ceci constitue un avancée considérable en comparaison au pont de diodes seul, mais voyons si le bilan énergétique est toujours aussi satisfaisant.

Intéressons-nous d'abord à la **puissance active** P .

☞ Sur LTspice, tracez les chronogrammes correspondant aux puissances instantanées $p_{mono}(t)$ (fournie par la source de tension monophasée) et $p_{out}(t)$ (consommée par la charge **Rcharge**).

☞ Relevez les valeurs moyennes de ces deux courbes, et déduisez-en P_{mono} , P_{out} et le rendement $\eta = P_{out}/P_{mono}$ du montage redresseur.

Bonne nouvelle, le rendement du montage ne s'est pas dégradé depuis qu'on a ajouté le condensateur de lissage. Il semble même s'être amélioré (pour passer de 88.9 % à 90.1 %).

Concentrons-nous désormais sur la **puissance apparente** S .

☞ Relevez les valeurs efficaces de tensions et de courants de sorte à obtenir la puissance S_{mono} transportée par la source de tension.

✎ Donnez le facteur de puissance du montage redresseur, sachant que $f_p = P/S = \cos(\varphi)$.

Cette fois, le facteur de puissance f_p est loin de la valeur idéale. Ce facteur indique que la puissance réellement consommée par le montage (P) ne représente qu'une part de la puissance transportée (S). Est-ce à dire que le reste de l'énergie est simplement échangée (Q) entre la source et le montage ? En régime sinusoïdal de tension et de courant, oui. Mais sommes-nous réellement dans ce cas ? ...

Limites de validité du théorème de Boucherot

Le théorème de Boucherot classique stipule que $S^2 = P^2 + Q^2$. Toutefois ceci ne s'applique qu'en **régime sinusoïdal de tensions et de courants** !

Lorsque le courant n'est plus sinusoïdal, nous ajoutons la prise en compte des harmoniques de courant qui créent une **puissance déformante** D . Le théorème de Boucherot se généralise et devient donc $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$.

Analyse en série de Fourier

Le principal problème du montage à pont de diodes avec capacité en tête est qu'il rejette un grand nombre d'harmoniques sur le réseau électrique, ce qui est préjudiciable dans de nombreuses applications (contraintes de surdimensionnement des infrastructures, vibrations mécaniques, perturbations électromagnétiques, ...). En effet la tension en entrée du redresseur est celle imposée par la source de tension **source_mono**. En revanche le courant n'est pas imposé par la source de tension mais par sa charge (du point de vue de la source, la charge est constituée du pont de Graetz, du condensateur et de la charge résistive **Rcharge**). Dans cette étude nous cherchons à quantifier l'impact des harmoniques du courant d'entrée (**I(source_mono)**).

Une première méthode d'analyse consiste à regarder la transformée de Fourier du signal, afin d'observer l'amplitude de ses harmoniques. Notez que plus le nombre d'échantillons dans le domaine temporel est élevé, plus la résolution fréquentielle après transformée de Fourier est fine.

» Passez le temps de simulation à 10 s (au lieu de 100 ms), commencez l'enregistrement des données à partir de 20 ms (pour éliminer la partie transitoire de l'analyse) puis lancez une simulation.

» Affichez la FFT (*Fast Fourier Transform*, algorithme de transformée de Fourier discrète) du courant de la source monophasée **I(source_mono)**. Pour cela, effectuez un clic-droit sur le chronogramme, puis cliquez sur **View > FFT**. Affichez le graphique avec une échelle linéaire (**Axe des ordonnées > Clic-droit > Linear**).

✎ Que pouvez-vous déduire du spectre affiché ?

À titre de comparaison, la Figure 5 donne le résultat de la transformée de Fourier du même montage mais en l'absence de condensateur de lissage (vous pouvez également l'obtenir par vous-même).

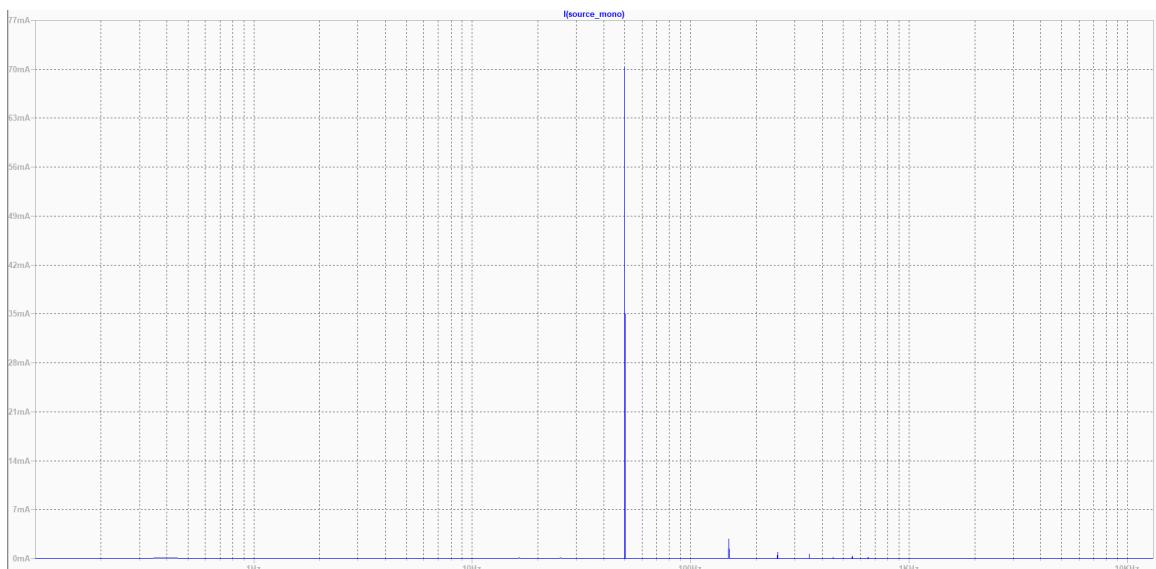


FIGURE 5 – Transformée de Fourier du courant sortant de la source de tension pour un montage à pont de diode *sans* condensateur de lissage.

Analyse du taux de distorsion harmonique

L'inconvénient de la transformée de Fourier est qu'il est difficile de comparer rapidement plusieurs signaux. Nous utilisons donc le **taux de distorsion harmonique (ou THD pour Total Harmonic Distortion)** qui est un critère chiffré, unique et facilement comparable. Il s'agit d'une mesure du poids des harmoniques d'un signal périodique en comparaison à sa fondamentale seule et s'exprime en pourcentage, à partir de la formule :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}$$

Plus le THD est proche de zéro, plus le signal est proche d'une sinusoïde pure.

La commande `.four` permet de procéder à une analyse en série de Fourier d'un signal donné, à l'issue d'une analyse temporelle (*transcient*). À partir des valeurs ainsi obtenues, le THD est calculé.

 Affichez le rapport de simulation (`[View] > SPICE Output Log`) et relevez le THD.

Vous l'aurez compris, le montage redresseur avec capacité en tête rejette une grande quantité d'harmoniques sur le réseau électrique. Pour prendre ces harmoniques en compte de le bilan de puissance, de nouvelles définitions sont apportées :

Puissance active $P = V_1 \times I_1 \times \cos(\phi_1)$ (en Watt W)

Puissance réactive $Q = V_1 \times I_1 \times \sin(\phi_1)$ (en Volt-Ampère Réactifs VAR)

Puissance déformante $D = V_1 \times \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}$ (en Volt-Ampère Déformants VAD)

Puissance apparente $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$ (en Volt-Ampère VA)

En y injectant la définition du THD, on peut reformuler l'expression de la puissance déformante :

$$D = V_1 \times \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2} = V_1 \times \sqrt{I^2 - I_1^2} = V_1 \times I_1 \times THD$$

 À partir de ces expressions et du rapport SPICE, donnez la valeur de la puissance déformante D_{mono} fournie par la source de tension. *Attention : le rapport généré par SPICE indique les amplitudes des harmoniques (et non les valeurs efficaces).*

 En reprenant les valeurs de P_{mono} et S_{mono} déterminées page 13, déterminez la valeur de puissance réactive Q_{mono} échangée entre la source de tension et le montage redresseur. Cette grandeur est-elle prépondérante dans le bilan des puissances ?

3.2 Expérimentation

Une nouvelle fois, nous allons comparer la simulation LTspice avec l'expérimentation.

Mise en marche du circuit

👉 Sur la maquette, ajoutez un cavalier à l'emplacement **J1**. Ceci a pour effet de brancher un condensateur de valeur $2200 \mu\text{F}$ en parallèle de la sortie du pont de diodes.

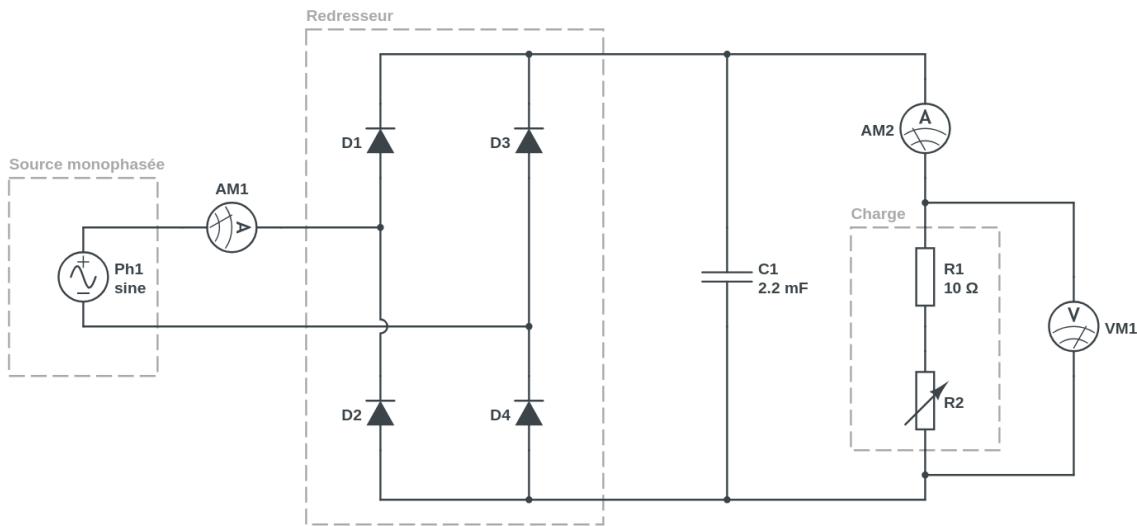


FIGURE 6 – Schéma expérimental du redresseur à pont de Graetz avec capacité en tête.

👉 À l'aide des sondes différentielles, visualisez sur oscilloscope les signaux $v_{mono}(t)$ et $v_{out}(t)$ et confirmez que vous retrouvez le fonctionnement prévu par la simulation.

👉 Si nécessaire réglez le rhéostat de sorte à obtenir une tension d'entrée parfaitement sinusoïdale (il se peut que la source de tension triphasée "s'écrase" en fonction du courant de charge).

Ondulation de la tension de sortie

👉 Relevez le courant moyen $\langle i_{out}(t) \rangle$ à l'aide d'un ampèremètre. Déduisez-en la valeur d'ondulation de tension de sortie ΔV_{out} .

👉 Donnez la valeur de l'ondulation de tension de sortie ΔV_{out} observée sur l'oscilloscope. Cela correspond-il à la valeur précédente ?

👉 Faites varier la valeur du rhéostat. Que pouvez-vous affirmer concernant l'ondulation de la tension de sortie ?

Bilan énergétique

De la même manière que pour la simulation, nous allons relever les différentes puissances du montage pour réaliser une étude énergétique du redresseur.

- ☛ Visualisez sur oscilloscope les grandeurs $v_{mono}(t)$, $i_{mono}(t)$ et $p_{mono}(t)$ en entrée du montage.
- ✎ En déduire la valeur de la puissance active P_{mono} fournie par la source de tension.

- ✎ Relevez les valeurs efficaces $V_{eff,mono}$ et $I_{eff,mono}$. En déduire la valeur de la puissance apparente S_{mono} fournie par la source de tension.

- ✎ La valeur de la puissance apparente S_{mono} obtenue ici est-elle proche de la valeur obtenue sans condensateur de lissage ?

- ✎ Déduisez-en le facteur de puissance f_p vu par le réseau électrique.

- ☛ Visualisez sur oscilloscope les grandeurs $v_{out}(t)$, $i_{out}(t)$ et $p_{out}(t)$ en sortie du montage.
- ✎ Relevez ainsi la valeur de la puissance active P_{out} consommées par la charge.

- ✎ Déduisez-en le rendement $\eta = P_{out}/P_{mono}$ du montage redresseur.

▣ Synthèse sur le pont de diodes avec capacité en tête

Le pont de diode complet avec capacité en tête (autrement dit avec un condensateur de lissage) permet certes d'obtenir une tension de sortie quasiment continue, mais ceci se fait au dépend du bilan énergétique. On observe une légère augmentation de la puissance réactive Q mais surtout une augmentation de la puissance déformante D , qui reflète l'apparition d'un fort courant pulsé (donc riches en harmoniques de forte amplitude). Du point de vue du fournisseur d'électricité, c'est un montage à proscrire.

4 Redresseur monophasé commandé

Les deux versions du redresseur que nous avons abordé ont un point commun : il s'agit de **redresseurs non-commandés**, construits à partir de diodes. Ces composants sont assez simples (comprenez peu chers) et permettent effectivement de réaliser une conversion AC/DC. Mais soit nous obtenons une tension très ondulée, soit nous obtenons un courant d'entrée très riche en harmoniques (trop pour répondre aux normes européennes par exemple). Dans un contexte industriel, les redresseurs non-commandés ne sont pas utilisés à cause des ces défauts précisément.

À la place des **redresseurs commandés** sont utilisés. Construits à partir de thyristors, MOSFET ou IGBT, ceux-ci permettent toujours de fournir une tension de sortie quasiment fixe tout en offrant désormais la possibilité d'absorber un courant sinusoïdal.

Le premier exemple donné Figure 7 remplace les diodes par des IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) qui permettent de piloter précisément le temps de conduction. De plus l'entrée est filtrée par un filtre passif constitué d'un condensateur et d'une bobine.

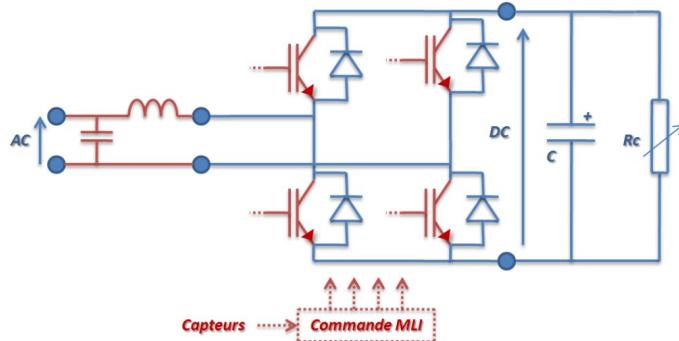


FIGURE 7 – Redresseur commandé (pont d'IGBT) avec filtre CL en entrée.

Le second exemple donné Figure 8 conserve un pont de diodes classique mais ajoute en sortie un montage à base d'IGBT. Cette partie de montage joue le rôle d'une charge variable dont la consommation de courant est pilotée.

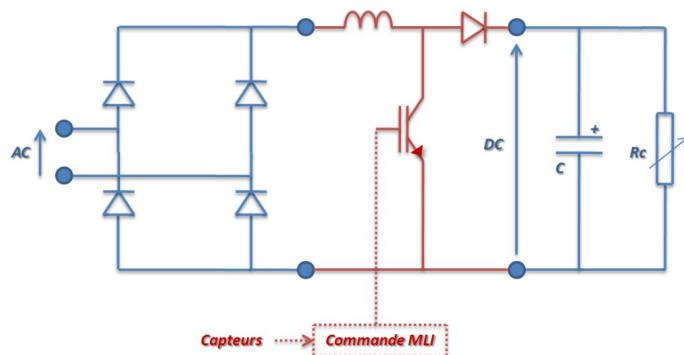


FIGURE 8 – Redresseur commandé par une charge variable pilotée.

Dans ces deux montages, une mesure du courant absorbé est réalisée et une commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est imposée pour effectuer un asservissement en courant.

5 Redresseur triphasé

Après avoir abordé le redresseur monophasé, il est temps de passer à sa version triphasée.

5.1 Simulation

Le fichier de simulation LTspice du redresseur triphasé est `tp_redresseur_triphase.asc`. Il est assez semblable à celui du redresseur monophasé, vous devinerez donc son fonctionnement.

Analyse dans le domaine temporel

💡 Rappelez, en régime triphasé, ce qu'est une *tension simple* et une *tension composée*.

⌚ Lancez une simulation dans le domaine temporel.

💻 Relevez sur un chronogramme les tensions *simples* de la source triphasée et la tension en sortie du montage. La tension de sortie **V(out)** semble-t-elle suivre les tensions simples de la source triphasée ?

💻 Relevez sur un autre *pane* les tensions *composées* de la source triphasée et la tension en sortie du montage. La tension de sortie **V(out)** semble-t-elle suivre les tensions composées ?

💻 Sur un troisième *pane* relevez le courant sortant d'une phase (**I(phi1)** par exemple) et le courant circulant dans la charge **I(Rcharge)**.

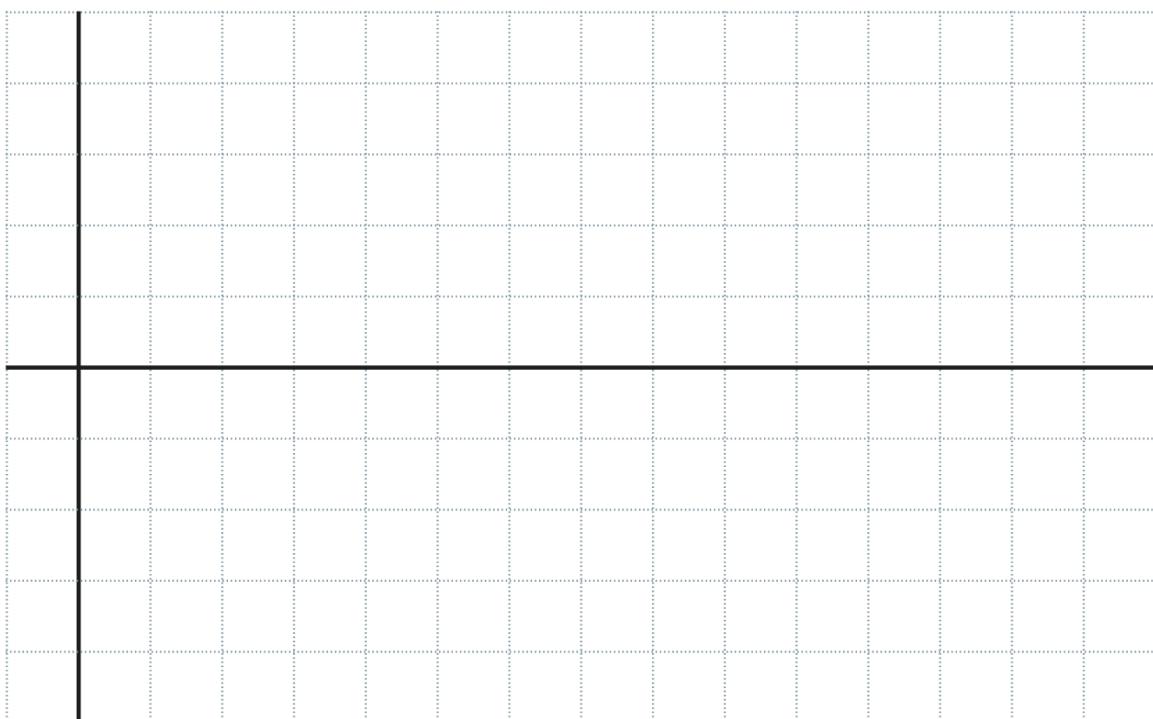
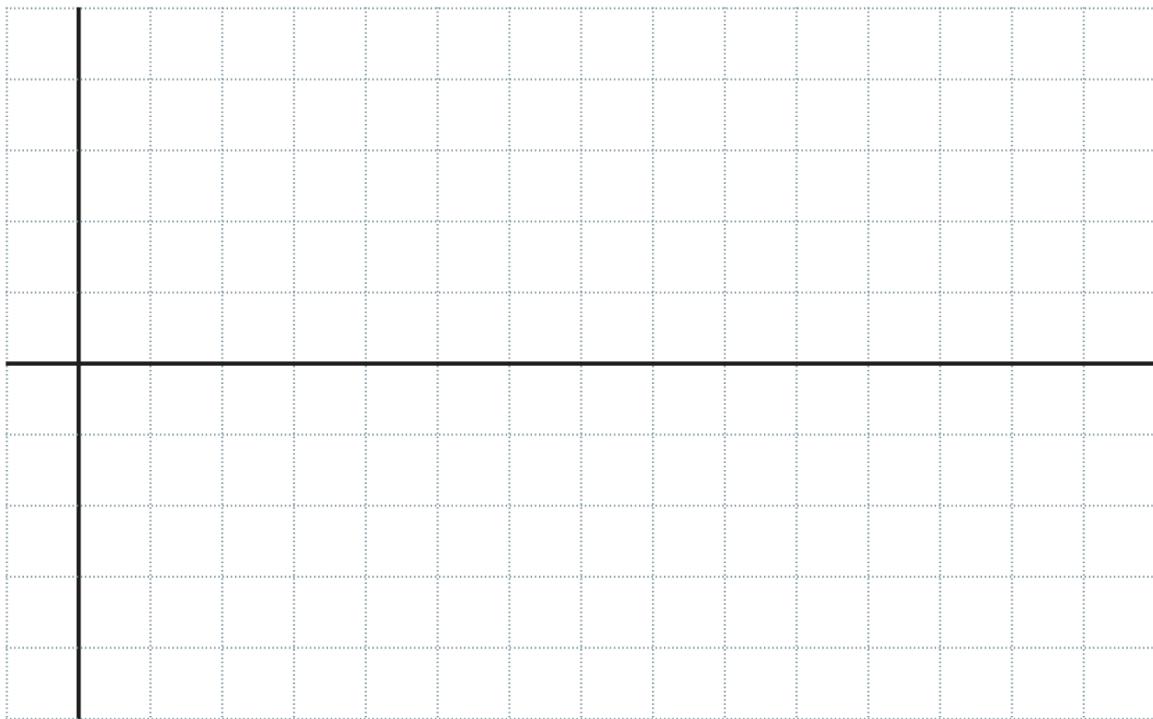
💡 Reportez les relevés de tensions composées et de courants sur le chronogramme page suivante.

💻 Expliquez le fonctionnement du montage à l'aide de ces deux chronogrammes, en indiquant notamment les intervalles de conductions des diodes. Donnez également la valeur de l'ondulation de tension ΔV_{out} en sortie du montage.

💡 Entrée en conduction des diodes

Dans un montage à **cathodes communes** (**D1, D3, D5**) et si la tension de seuil est atteinte pour plusieurs diodes, alors celle qui conduira sera celle qui a le potentiel d'anode le plus élevé.

Dans un montage à **anodes communes** (**D2, D4, D6**) et si la tension de seuil est atteinte pour plusieurs diodes, alors celle qui conduira sera celle qui a le potentiel de cathode le plus négatif.



Bilan énergétique

■ Tracez le chronogramme de la puissance instantanée consommée par la charge et déduisez-en la puissance P_{out} .

■ Tracez le chronogramme de la puissance instantanée fournie par la source triphasée et déduisez-en la puissance active P_{tri} . (Rappel en triphasé : $p_{tri}(t) = 3 \times p_{ph}(t) = 3 \times v_{ph}(t) \times i_{ph}(t)$).

■ Que vaut le rendement $\eta = P_{out}/P_{tri}$ du montage ?

■ Relevez les valeurs efficaces de tension $V_{eff,ph}$ et de courant $I_{eff,ph}$ d'une phase. Dédouisez-en la puissance apparente $S_{tri} = 3 \times S_{ph}$ transportée par la source de tension triphasée.

■ Que vaut le facteur de puissance $f_p = P_{tri}/S_{tri}$ en entrée du montage ?

■ Relevez dans le *SPICE Output Log* la valeur du THD et la valeur efficace de la fondamentale du courant `I(source_ph1)` (attention, le rapport donne l'amplitude et non la valeur efficace). Dédouisez-en la puissance déformante $D_{tri} = 3 \times D_{ph}$ transportée par la source de tension triphasée.

■ Appliquez le théorème de Boucherot pour retrouver la puissance réactive Q_{tri} échangée entre la source de tension triphasée et le montage.

■ À partir de l'ensemble de ces résultats, indiquez quelle est la principale cause de dégradation du facteur de puissance f_p .

5.2 Expérimentation

À l'aide de l'ensemble du matériel proposé (voir section « [1.3. Matériel pour l'expérimentation](#) » page [4](#)), nous allons tenter d'obtenir des résultats par la mesure.

Mise en marche du circuit

👉 Réalisez le montage présenté ci-dessous (Figure 9, notez l'absence du condensateur de lissage). Demandez validation auprès de l'enseignant avant de poursuivre.

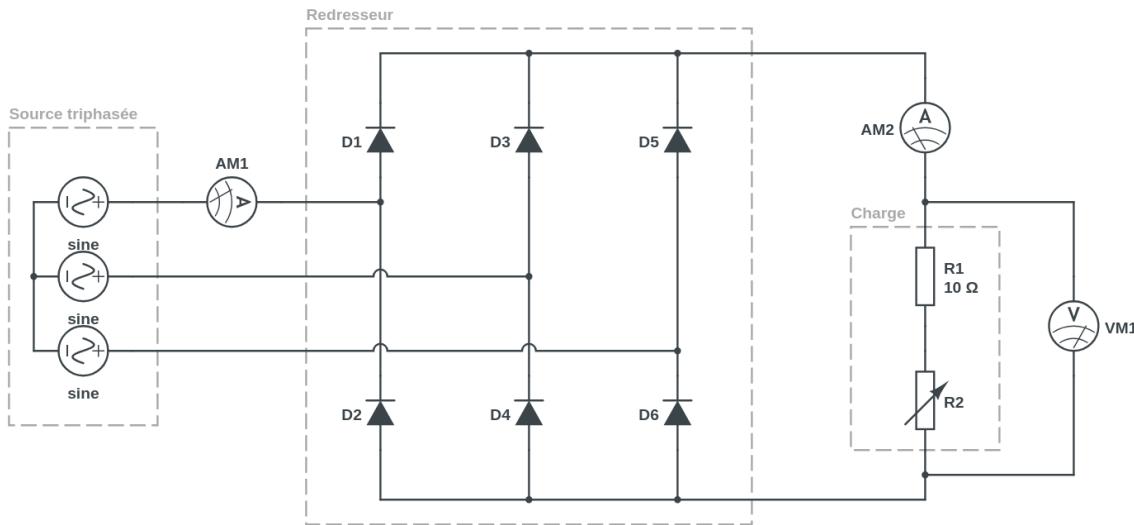


FIGURE 9 – Schéma expérimental du redresseur à pont de Graetz.

👉 Réglez le rhéostat de sorte à obtenir $\langle i_{out}(t) \rangle \simeq 265mA$ (mêmes conditions que dans la simulation LTspice).

👉 À l'aide des sondes différentielles, visualisez sur oscilloscope les signaux $v_{ph1}(t)$, $u_{12}(t)$ et $v_{out}(t)$ et confirmez que vous retrouvez le fonctionnement prévu par la simulation.

👉 Donnez la valeur moyenne $\langle v_{out}(t) \rangle$ de la tension de sortie ainsi que son ondulation ΔV_{out} .

Bilan énergétique

De la même manière que pour la simulation, nous allons relever les différentes puissances du montage pour réaliser une étude énergétique du redresseur.

 Visualisez sur oscilloscope les grandeurs $v_{ph1}(t)$, $i_{ph1}(t)$ et $p_{ph1}(t)$ en entrée du montage redresseur.

 En déduire la valeur de la puissance active $P_{tri} = 3 \times P_{ph}$ fournie par la source de tension.

 Relevez les valeurs efficaces $V_{eff,ph1}$ et $I_{eff,ph1}$. En déduire la valeur de la puissance apparente $S_{tri} = 3 \times S_{ph}$ fournie par la source de tension.

 Déduisez-en le facteur de puissance f_p vu par le réseau électrique.

 Visualisez sur oscilloscope les grandeurs $v_{out}(t)$, $i_{out}(t)$ et $p_{out}(t)$ en sortie du montage.

 Relevez ainsi la valeur de la puissance moyenne P_{out} consommée par la charge.

 Déduisez-en le rendement η du montage redresseur.

Synthèse sur le redresseur triphasé

De manière similaire au redresseur monophasé, le redresseur triphasé possède un rendement intéressant mais rejette des harmoniques de courant sur le réseau électrique. Ceci empire si on décide d'ajouter un condensateur de lissage pour diminuer l'ondulation de la tension de sortie. Ainsi les redresseurs triphasés utilisés dans l'industrie sont commandés : des thyristors, MOSFET ou IGBT font office d'interrupteurs statiques à la place des diodes.