



Dpt. SE – SE2A

Électronique de puissance

Travaux pratiques

Florian Chevalier¹, Philippe Delarue¹, Hugo Helbling¹

¹L2EP, Polytech'Lille, Université de Lille



Table des matières

	Introduction - Consignes de sécurité	1
1	Sécurité	1
2	Appareils de mesure	2
2.1	Câblage des appareils	2
2.2	Matériel de la salle de TP	3
	a. Le multimètre : la mesure rapide	3
	b. Les sondes : la mesure en fonction du temps	3
	c. Mesure de puissance	4
	d. L'oscilloscope	5
3	Préparation et compte-rendu	6
3.1	Préparation à faire avant la séance	6
3.2	Synthèse des opérations réalisées	7
	a. Objectifs du compte-rendu de TP	7
	b. Organisation du compte-rendu	7
3.3	Évaluation du TP	8
4	Fin de la séance	9
1	Le hacheur abaisseur	11
	Objectifs et pré-requis	11
	Introduction	11
1	Préparation	12
1.1	Synthèse des interrupteurs	12
1.2	Tracé des formes d'ondes et relations fondamentales	12

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

2	Manipulations	13
2.1	Preliminaires	13
2.2	Formes d'ondes du hacheur simple	13
2.3	Évolution de la tension de sortie	14
2.4	Influence de L_{ch} et R_{ch}	14
2.5	Influence de la fréquence	15
3	Conclusion	15
2	Onduleur monophasé — Partie 1	17
	Objectifs et pré-requis	17
	Introduction	17
1	Préparation	18
1.1	Analyse harmonique — Rappel	18
1.2	Fonctionnement de l'onduleur pleine onde	18
2	Manipulations	19
2.1	Preliminaires	19
2.2	Onduleur fonctionnant en pleine onde débitant sur une charge RL	19
3	Conclusion	20
3	Onduleur monophasé — Partie 2	21
	Objectifs et pré-requis	21
	Introduction	21
1	Préparation	22
1.1	Fonctionnement de l'onduleur résonant	22
1.2	Onduleur fonctionnement en MLI	22
2	Manipulations	22
2.1	Preliminaires	22
2.2	Onduleur fonctionnant en pleine onde débitant sur une charge résonante RLC	22
2.3	Onduleur fonctionnant en MLI	23
3	Conclusion	24
4	Redresseur monophasé — Partie 1	25
	Introduction et objectifs	25
1	Préparation	25
2	Manipulations	27
2.1	Preliminaires	27
2.2	Étude du redressement simple alternance	27
2.3	Étude du redressement simple alternance avec diode de roue libre	27
3	Conclusion	28

5	Redresseur monophasé — Partie 2	29
	Introduction et objectifs	29
1	Préparation	29
2	Manipulations	30
2.1	Préliminaires	30
2.2	Étude du redressement double alternance sur charge RL	30
2.3	Débit sur charge RC	31
3	Conclusion	32



Introduction - Consignes de sécurité

1 Sécurité

Comparée à d'autres disciplines de votre formation, l'expérimentation en électrotechnique et électronique de puissance comporte des risques électriques dûs aux niveaux élevés de tension et de courant mis en œuvre (alternatifs ou continus). Ces peuvent entraîner la dégradation ou la destruction du matériel, ainsi que la mort de l'opérateur (c'est-à-dire *vous*) par électrocution.

Cependant, ***ne cédez pas à la panique***, le respect de règles simples de sécurité permet de ramener ce risque à un niveau très faible. Ces règles doivent être respectées ***impérativement*** :

- toujours effectuer les câblages ou la modification des montages ***hors tension***,
- faire vérifier systématiquement le montage par l'enseignant ***avant*** toute mise sous tension,
- utiliser des câbles adaptés avec des fiches de sécurité,
- veiller à bien attacher vos effets personnels (bracelets, colliers, cheveux longs, manches amples, voiles & foulards...),
- les paillasses sont équipées de boutons d'arrêt d'urgence à utiliser, comme leur nom l'indique, seulement en cas d'*urgence*,
- en cas de doute sur la démarche expérimentale, faire appel à l'enseignant.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

2 Appareils de mesure

2.1 Câblage des appareils

Le nom des appareils explicite souvent la grandeur qu'il mesure. Le câblage de l'appareil n'est cependant pas le même selon la grandeur mesurée.

Ainsi, un **ampère-mètre** mesure l'intensité du courant et doit être placé en **série** dans le circuit. L'ajout d'un ampère-mètre dans un circuit déjà câblé va nécessiter l'interruption d'ouvrir le circuit : cette opération doit donc se faire **hors tension**. On peut également utiliser une **pince de courant** que l'on placera autour du câble dans lequel on veut mesurer l'intensité du courant. Cette manipulation sans interruption du circuit pourra se faire pendant le fonctionnement.

Un **volt-mètre** mesure une **différence de potentiel** entre deux points, également appelée **tension** électrique. Il doit donc être placé en **dérivation** ou **parallèle** entre les deux points du circuit.

R Confondre ces deux appareils et leur câblage respectif peut entraîner la destruction du matériel, ainsi qu'un risque de blessure ou brûlure de l'opérateur.

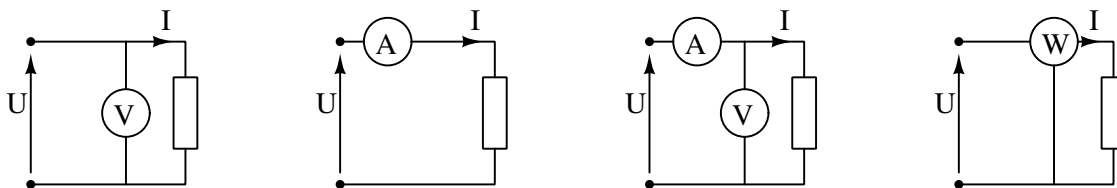


Fig. 1 — Représentation et câblage des différents appareils de mesure et disposition idéale : volt-mètre, ampère-mètre, méthode volt-ampérométrique, watt-mètre

Un **ohm-mètre** mesure une **résistance** électrique, et se place donc aux bornes de l'élément à caractériser.

L'association d'un volt-mètre et d'un ampère-mètre peut permettre, dans certaines conditions, de mesurer la puissance. D'une manière générale, il faut toujours privilégier l'installation du volt-mètre au plus près de l'élément dont on souhaite connaître la tension, afin de s'affranchir des chutes de tensions dans les autres éléments. Cependant, en particulier dans les systèmes alternatifs, la mesure de puissance se fera à l'aide d'un **watt-mètre**. Ce dernier appareil comporte un circuit tension, à câbler en dérivation, et un circuit courant à câbler en série.

Tous ces appareils comportent différents **calibres**, qui permettent d'ajuster leur précision en fonction de la valeur de la grandeur à mesurer :

- la mesure d'un courant de l'ordre de 1,2 A sera plus précise avec le calibre 3 A qu'avec le calibre 10 A ;
- en revanche, la mesure d'un courant de 8 A avec le calibre 3 A risque de détruire l'appareil de mesure !

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

Il faut donc toujours avoir à l'esprit l'ordre de grandeur de ce que l'on souhaite mesurer. Ces remarques s'appliquent bien sûr aux autres grandeurs (tension, résistance, puissance...).

2.2 Matériel de la salle de TP

De nombreux appareils de mesure sont disponibles en salle de TP, sous différentes formes. Ces appareils n'offrent pas tous les mêmes possibilités et ne pourront pas être utilisés dans les mêmes conditions. Leurs positions ne sont pas interchangeables. Ces appareils sont fragiles et chers, ils doivent donc être manipulés avec précaution lors de leur installation et de leur utilisation (choix du calibre de mesure par exemple).

a. Le multimètre : la mesure rapide

Le plus générique est le *multimètre portable* : il servira principalement à mesurer tension, courant et résistance. Selon la grandeur à mesurer et donc au câblage de l'appareil dans le circuit (dérivation ou série), il faudra utiliser différentes bornes. Il faut donc toujours veiller à ce que le câblage de l'appareil corresponde à la grandeur à mesurer, choisie par le sélecteur central. Une modification de câblage devra toujours se faire hors tension.



Fig. 2 — Multimètre portable électronique ; il permet principalement de mesurer tension, courant en continu et en alternatif (il donne dans ce dernier cas la valeur efficace), et la résistance, selon différents calibres

b. Les sondes : la mesure en fonction du temps

Les *sondes de tension* et *de courant* permettent la mesure respectivement de la tension et du courant, en continu et en alternatif, et permettent leur visualisation sur l'écran de l'oscilloscope. Une tension se mesure toujours entre deux points (différence de potentiel), la sonde de tension sera donc à câbler entre deux points du circuit. On parle de sonde *différentielle* car il n'est pas nécessaire de choisir comme référence une masse ou le

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

neutre (dont le potentiel est fixé par convention à 0 V). La sonde de courant se présente sous forme d'une pince capable d'encercler le câble dans lequel on veut mesurer l'intensité du courant.

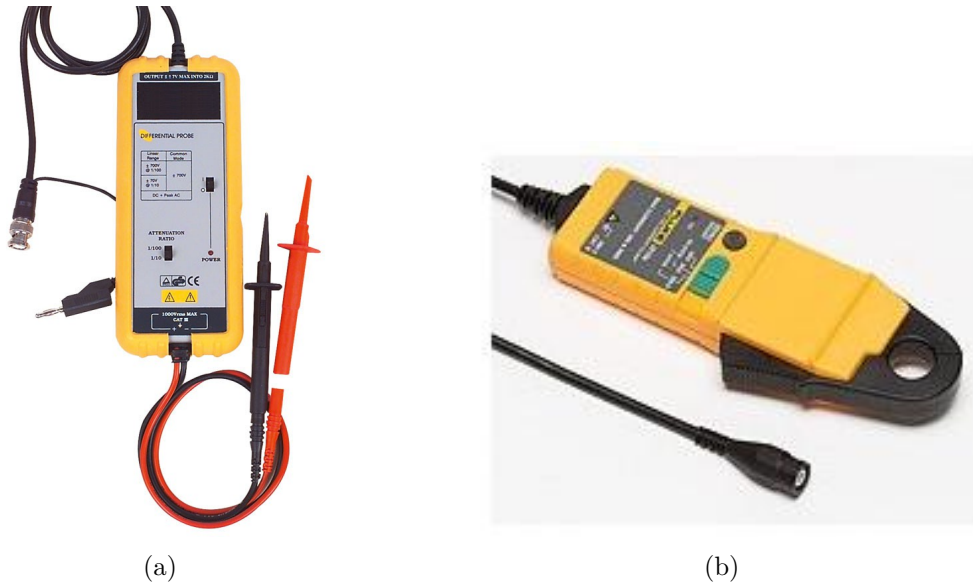


Fig. 3 – La sonde de tension (a) s'installe en dérivation et permet de mesurer la différence de potentiel entre les deux points du circuit aux bornes duquel elle est branchée ; la sonde de courant (b) se présente sous forme d'une pince et permet d'entourer le fil dans lequel on souhaite mesurer le courant

Les sondes de tension et de courant présentent une *atténuation*. Dans le cas de la sonde de tension, la tension mesurée est atténuée par 10 ou 100, c'est-à-dire que son amplitude est divisée par 10 ou 100 respectivement. Ainsi, l'amplitude du signal transmis à l'oscilloscope est faible : il n'y a alors aucun risque à transporter un signal basse tension. La sonde de courant procède de manière analogue afin de transmettre un signal basse *tension* ; en effet, en plus de la mesure, cet appareil assure une conversion courant vers tension, avec un facteur d'échelle. Le calibre utilisé la plupart du temps en TP sera 100 mV/A, c'est-à-dire une atténuation par 10 du signal mesuré. Les courants mesurés étant généralement de l'ordre de 1 à 10 A, cette atténuation permet d'avoir une mesure suffisamment précise sans présenter de danger.

c. Mesure de puissance

La mesure de puissance nécessite une mesure du courant et de la tension de façon concomitante. De plus, certains calculs sont nécessaires, notamment en alternatif avec la mesure du déphasage entre courant et tension. Pour cela, un appareil spécifique appelé *watt-mètre* est disponible. La grandeur fournie par le watt-mètre est la *puissance active*, exprimée en *Watt*. Il s'agit d'un appareil disposant donc de deux circuits à câbler : un pour

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

la mesure de *tension* à câbler en *dérivation*, un autre pour la mesure de *courant* à câbler en *série*.



Fig. 4 – Deux watt-mètres sous forme de pince : le circuit tension est à câbler en parallèle, et la pince permet la mesure du courant dans un câble sans avoir à ouvrir le circuit ; (a) appareil fonctionnant en continu et alternatif, (b) appareil fonctionnant seulement en alternatif à 50 Hz

Les watt-mètres dont nous disposons en salle de TP présentent un circuit courant sous forme de pince. Il suffit alors de placer dans la pince le fil dans lequel on souhaite mesurer l'intensité du courant. Ainsi, il n'est pas nécessaire de couper l'alimentation pour ouvrir le circuit et installer l'appareil de mesure.

d. L'oscilloscope

L'oscilloscope n'est pas un appareil de mesure en lui-même, mais permet de visualiser au cours du temps l'évolution des grandeurs électriques. Il faut appliquer sur ses entrées une tension de valeur assez faible. C'est pourquoi, dans notre cas des sondes sont utilisées :

- la sonde de tension permet d'adapter le niveau de tension mesurée à la valeur de tension admissible par l'oscilloscope,
- la sonde de courant assure la conversion fidèle d'un courant en une tension de valeur admissible par l'oscilloscope.

Il est possible de renseigner la valeur de l'atténuation des sondes directement dans l'oscilloscope. Ainsi, la valeur affichée sur l'écran de l'oscilloscope sera une image fidèle de la grandeur mesurée (tension ou courant), avec la bonne échelle.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

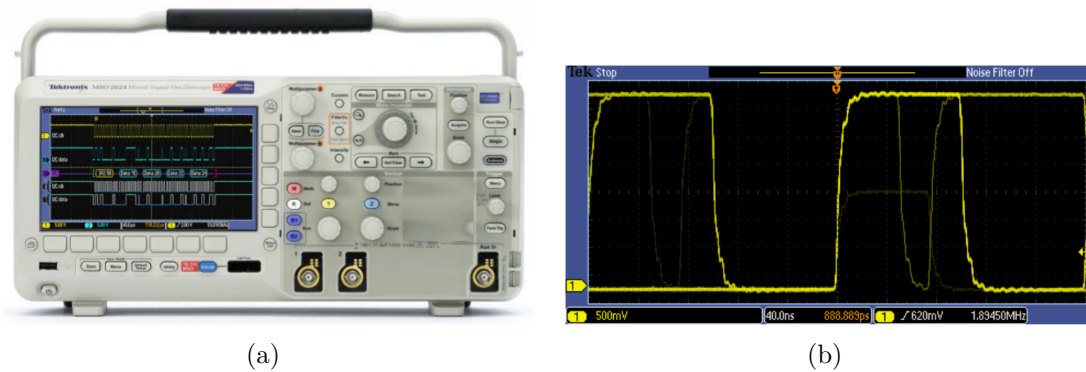


Fig. 5 – (a) Oscilloscope à deux entrées permettant de visualiser un signal (b)

Les oscilloscopes de la salle de TP disposent de deux entrées (*chaînes 1 & 2*) sous forme de connecteurs BNC (coaxiaux). Chacune des deux voies est réglable de manière indépendante :

- la *sensibilité verticale* doit être réglée de manière à visualiser la totalité du signal sur l'échelle verticale ; elle se règle par division, l'écran de l'oscilloscope présente 10 divisions ; il faut garder à l'esprit le rapport entre la valeur maximale et la valeur efficace d'une grandeur alternative pour être sûr de bien visualiser un signal.
- l'atténuation de chacune des sondes, et éventuellement la conversion réalisée.
- des mesures peuvent être réalisées directement par l'oscilloscope (valeur moyenne, valeur efficace...), à condition de visualiser un temps suffisamment représentatif, c'est-à-dire au moins une période complète du signal.

L'échelle horizontale représente le temps. Elle est également graduée en divisions (10 dans notre cas), et le base de temps correspond à la durée de chaque division. Il faut s'assurer de visualiser sur l'écran au moins une période complète. Ainsi, il faut garder à l'esprit la relation entre la fréquence d'un signal et sa période. À l'opposé, dans le cas d'un signal périodique, il ne sera pas utile de visualiser un trop grand nombre de périodes, le signal se répétant à l'identique.

3 Préparation et compte-rendu

3.1 Préparation à faire avant la séance

Nous vous demandons de préparer la séance avant de vous présenter. Les questions qui vous sont posées doivent vous permettre de mettre en place des calculs qui seront nécessaires au cours de la séance de TP. La préparation a également pour but de vous familiariser avec le matériel (dispositifs à étudier et appareils de mesure) ainsi que les différentes techniques de câblage. Il est par ailleurs indispensable d'avoir assimilé le contenu du cours avant chaque séance de travaux pratiques.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

En procédant de manière consciencieuse à ce travail préparatoire, vous pourrez utiliser au mieux le temps de la séance pour toutes les opérations expérimentales. Vous serez ainsi plus sereins pendant la séance et pourrez alors prendre le recul nécessaire sur vos essais, et adopter l'attitude caractéristique d'un ingénieur.

Cette partie théorique va présenter le principe de l'expérience, les lois physiques et les équations qui la régissent. N'oubliez pas de préciser les unités et de définir les grandeurs utilisées dans vos calculs.

La liste du matériel utilisé et les schémas de mesure doivent permettre de préciser le rôle de chaque appareil, et ainsi aider une personne qui n'a pas réalisé le TP de disposer de tous les éléments nécessaires pour le reproduire.

3.2 Synthèse des opérations réalisées

a. Objectifs du compte-rendu de TP

Le compte-rendu de travaux pratiques est le premier document scientifique que vous êtes amenés à rédiger. À ce titre, il doit être écrit dans un style concis et clair en évitant toute forme de style littéraire ou télégraphique. Le langage scientifique possède des termes ayant un sens précis et sans équivoque, il faut les utiliser au besoin sans en abuser. Un terme mal choisi peut parfois modifier totalement le sens d'une phrase ou la rendre incompréhensible. Les abréviations peuvent être utilisées à condition qu'elles aient été définies lors de leur premier usage. Le compte-rendu sera transmis à l'enseignant en fin de séance ou dans un délai maximum de 1 semaine. Le compte-rendu peut être envoyé en format pdf ou remis au format papier. L'enseignant peut vous offrir un retour commenté sur la qualité de votre compte rendu.

La structure d'un compte-rendu de travaux pratiques comprend : un titre, une introduction, une partie de mise en œuvre, les résultats, leur interprétation et une conclusion. Il s'agit d'une synthèse du travail effectué pendant la séance. Il vous permet de retenir ce que vous avez appris en opérant les manipulations. Bien qu'il permette à l'enseignant de vérifier que le travail a été bien fait, le compte-rendu vous permet surtout de montrer que vous avez compris et que vous vous êtes approprié les notions de cours associées aux manipulations. Il s'agit ainsi également d'un document de travail destiné à votre usage personnel.

b. Organisation du compte-rendu

Le compte-rendu commence par une *introduction* qui présente brièvement l'objectif de la séance.

L'énoncé du TP étant organisé selon une progression logique, les manipulations successives doivent vous amener à comprendre un point particulier du thème abordé. Cette progression doit également apparaître dans le compte-rendu. Avant de traiter une question ou un groupe de questions, demandez-vous ce qu'on veut vous faire découvrir, c'est-à-dire posez la problématique. Expliquez alors le but de la manipulation que vous allez réali-

ser. Décrivez ensuite la manipulation, assez précisément pour être capable de la refaire ultérieurement. Vous pouvez insérer des impressions d'écran et des schémas pour illustrer votre propos. Toute illustration doit comporter une légende. Enfin, rédigez une conclusion à la question. Votre conclusion répond à la problématique présentée en introduction à la question.

Souvenez-vous que le lecteur du compte-rendu doit pouvoir le lire sans avoir à se référer à l'énoncé pour comprendre vos démarches et manipulations.

La présentation des résultats de mesure peut se faire à l'aide d'un *tableau*, toujours précédé d'une légende. La légende donne les informations nécessaires pour comprendre la nature des valeurs du tableau, en commençant par l'information la plus générale et terminant par la plus spécifique. Il faut faire apparaître pour chaque ligne ou colonne la nature et les unités des grandeurs dimensionnées.

Une présentation *graphique* (elle aussi légendée) peut être utile pour mettre en évidence la relation entre deux variables d'une mesure. D'une manière générale, il faut privilégier l'axe des x en bas et l'axe des y à gauche, orientés vers la droite et vers le haut respectivement. N'oubliez pas d'indiquer la nature et les unités.

Toute expérience scientifique est suivie d'une *interprétation* : il faut donner les variables mises en jeu et les commentaires indispensables. Commentez les résultats que vous avez obtenus et non ceux que vous auriez dû obtenir :

- précisez les hypothèses que vous avez fait,
- au besoin, effectuez les calculs nécessaires à la validation des hypothèses,
- tenez compte des incertitudes liées aux mesures,
- répondez aux questions de l'énoncé, ces questions sont là pour vous guider.

La *conclusion* termine le compte-rendu et doit tirer une leçon du travail réalisé par rapport à l'objectif fixé. Vous pouvez également apporter une appréciation personnelle sur vos travaux, comme la comparaison de vos résultats avec des références, les améliorations à apporter à la manipulation ou au procédé de manipulation, discussion des résultats...

3.3 Évaluation du TP

La notation prendra en compte :

- la précision et la qualité du travail de préparation au début de la séance,
- la pertinence des manipulations et la justesse des conclusions,
- le choix du vocabulaire scientifique et technique,
- l'esprit de synthèse et l'accessibilité du document,
- la qualité de l'introduction et de la conclusion,
- la qualité de l'orthographe et de la présentation,
- le travail réalisé en séance et le comportement général.

N'oubliez que le compte-rendu est un outil de communication, d'abord au sein, plus généralement entre les membres d'une communauté scientifique.

4 Fin de la séance

À la fin de la séance, *merci de ranger à sa place le matériel, y compris les câbles sur chacune des paillasses.*

Également, pensez à prendre quelques minutes pour faire le point sur ce qui vous a été demandé lors de la préparation :

- à quelles notions avez-vous fait appel pour le travail de préparation ?
- comment ces notions vous ont-elles aidé au cours de la séance ?
- quels phénomènes avez-vous mis en évidence dans cette séance ? Comment peut-on les exploiter et en quoi sont-ils caractéristiques du système étudié ?

Cette réflexion doit vous permettre de structurer la synthèse qui vous est demandé : votre travail sera évalué sur l'analyse de vos résultats de mesures. Vous devez ainsi mettre en évidence quelles sont les conséquences des résultats de vos mesures, et comment les exploiter dans un cadre industriel.



1. Le hacheur abaisseur

Objectifs et pré-requis

Cette séance a pour objectifs :

- l'étude d'un montage abaisseur de tension à base de composants électroniques de puissance,
- la prévision de l'ondulation de courant en sortie du convertisseur en fonction de la charge et des conditions d'alimentation, dans le cas d'une charge fortement inductive.

Les pré-requis sont :

- l'étude d'un hacheur simple,
- l'utilisation d'un oscilloscope,
- les mesures physiques de courant et de tension.

Introduction

Le hacheur est un convertisseur continu-continu permettant de régler, avec un très bon rendement, la tension de sortie. Par exemple, on le rencontre dans certains variateurs de vitesse pour alimenter un moteur à courant continu, et son principe est utilisé dans les alimentations à découpage des ordinateurs.

Dans un hacheur, la tension source est *hachée* (on dit aussi *découpée*) par un interrupteur fonctionnant en commutation (états *passant* et *bloqué*). C'est la valeur moyenne de la tension découpée, obtenue après filtrage, qui détermine la tension de sortie. Ce principe permet d'obtenir des coûts et des encombrements plus petits que les solutions linéaires (figure 1.1).

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

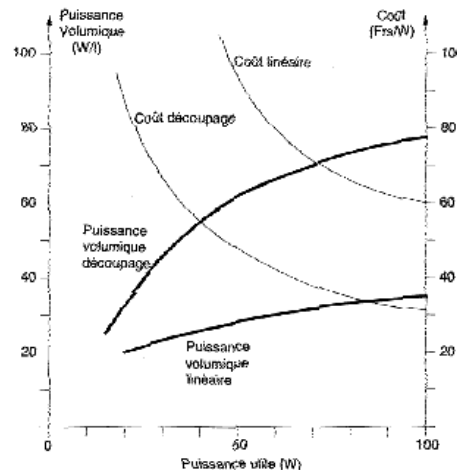


Fig. 1.1 – Comparaison des puissances volumiques pour 2 types de solution, d'après J.P. Ferrieux et F. Forest, *Alimentations à découpage, Convertisseurs à résonance, Principes, composants, modélisations*, Dunod, juin 2006

1 Préparation à faire avant la séance

1.1 Synthèse des interrupteurs

On considère le montage de la figure 1.2 représentant un *hacheur série* (ou *hacheur abaisseur*) débitant sur une charge RL . La source V_{in} est une tension parfaitement constante, et on cherche à faire varier la tension v_{out} entre les valeurs 0 V et V_{in} .

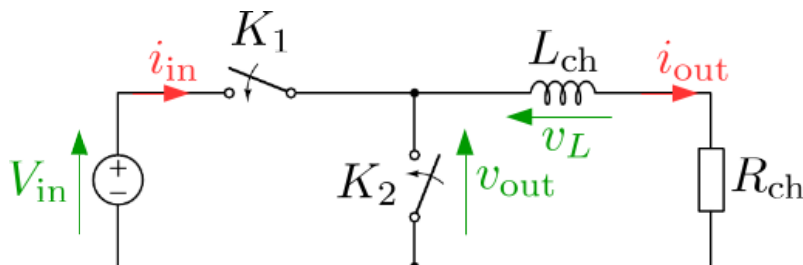


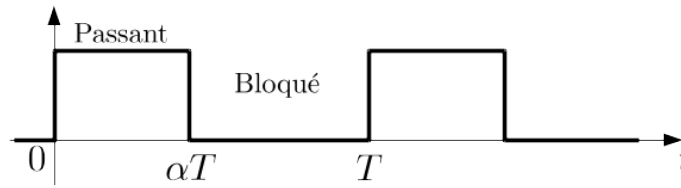
Fig. 1.2 – Schéma de principe d'un hacheur abaisseur

Question 1.1 Remplacer les interrupteurs K_1 et K_2 par les composants électroniques adaptés. Justifier. ■

1.2 Tracé des formes d'ondes et relations fondamentales

L'interrupteur K_1 est commandé à la fréquence $f_{sw} = \frac{1}{T_{sw}}$. Soit α le rapport cyclique. L_{ch} est suffisamment grande pour pouvoir considérer que $\tau = \frac{L_{ch}}{R_{ch}} \gg T$ de manière à supposer les variations du courant linéaires.

Question 1.2 Rappeler la définition du rapport cyclique. ■

Fig. 1.3 – Ordre de commande de l'interrupteur K_1

Question 1.3 D'après la forme d'onde temporelle de la figure 1.3, tracer, en fonction du temps, les évolutions temporelles de v_{out} , i_{out} et i_{in} (on supposera le régime établi atteint). ■

Question 1.4 Donner l'expression de la tension v_L , aux bornes de L_{ch} , en fonction de i_{out} et de L_{ch} . En déduire que la valeur moyenne, notée V_L , est nulle sur une période de découpage en régime permanent. ■

Question 1.5 Donner la relation liant v_{out} , V_L , R_{ch} et i_{out} . En déduire la relation liant les valeurs moyennes V_{out} et I_{out} avec R_{ch} , calculées sur une période de découpage. ■

Question 1.6 Donner l'expression de la valeur moyenne V_{out} en fonction de V_{in} et α . ■

Question 1.7 Déterminer l'expression de l'ondulation de courant de sortie Δi_{out} en fonction de α , L_{ch} , f_{sw} et V_{in} . ■

2 Manipulations

La maquette se compose :

- d'un hacheur série 60 V – 1,5 A, avec réglage de la fréquence et du rapport cyclique,
- d'une alimentation continue fixe,
- d'une résistance de charge et d'une inductance variables.

2.1 Préliminaires

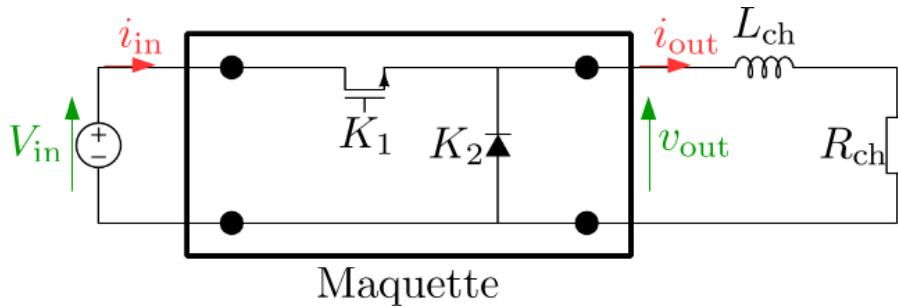
Question 2.1 Régler la résistance de charge à une valeur de 50 Ω . ■

2.2 Formes d'ondes du hacheur simple

Réaliser le montage de la figure 1.4, en ajoutant les appareils permettant :

- la mesure de V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out} ,
- la visualisation de v_{out} , i_{in} , i_{out} .

Régler l'inductance L_{ch} à sa valeur minimale ($L_{ch} = 150$ mH), $f_{sw} = 500$ Hz et $\alpha = 0,3$.

Fig. 1.4 – Maquette du hacheur abaisseur sur charge RL

Question 2.2 Relever V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out} .

Relever v_{out} et i_{out} , puis v_{out} et i_{in} en fonction du temps. ■

Question 2.3 Comparer les formes d'ondes relevées avec celles de la préparation. Indiquer les temps de conduction du transistor et de la diode. ■

Question 2.4 À partir des oscillogrammes, calculer les valeurs de f_{sw} et α réelles. ■

Question 2.5 Mesurer le courant $i_{out-eff}$ et en déduire le rendement pour ce point de fonctionnement. ■

2.3 Évolution de la tension de sortie

Pour le même montage que précédemment, on se propose d'étudier l'influence du rapport cyclique α . Les autres éléments restent réglés aux mêmes valeurs que précédemment.

Question 2.6 Pour α variant de 0,1 à 1, relever V_{out} .

Pour chaque point, relever la valeur de α réelles. ■

Question 2.7 Tracer $V_{out} = f(\alpha)$. ■

Question 2.8 Quelle est l'influence de la fréquence de découpage f_{sw} sur la tension de sortie ? Justifier expérimentalement. ■

2.4 Influence de L_{ch} et R_{ch}

Le montage reste inchangé, on règle $\alpha = 0,5$.

Question 2.9 Pour L_{ch} variant de 150 mH à 1,2 H, relever I_{out} et Δi_{out} . ■

Question 2.10 On fixe $L_{ch} = 150$ mH, et on désire faire varier I_{out} de 0 à 0,8 A. Quel élément faut-il régler ?

Relever dans ce cas I_{out} et Δi_{out} en fonction de R_{ch} . ■

Question 2.11 Tracer les courbes $I_{\text{out}} = f(R_{\text{ch}})$ et $I_{\text{out}} = f(fL_{\text{ch}})$. Quel élément permet de régler le courant de sortie ? ■

Question 2.12 Tracer les courbes $\Delta i_{\text{out}} = f\left(\frac{1}{R_{\text{ch}}}\right)$ et $\Delta i_{\text{out}} = f\left(\frac{1}{fL_{\text{ch}}}\right)$. Quel élément influe sur l'ondulation du courant de sortie ? Justifier. ■

2.5 Influence de la fréquence

Le montage reste inchangé (selon figure 1.4), avec $L_{\text{ch}} = 150 \text{ mH}$, $R_{\text{ch}} = 50 \Omega$ et $\alpha = 0,5$.

Question 2.13 Relever Δi_{out} pour f_{sw} variant de 500 Hz à 11 kHz. ■

Question 2.14 Tracer $\Delta i_{\text{out}} = f\left(\frac{1}{f}\right)$. ■

3 Conclusion

Question 3.1 Faire une synthèse de l'influence de chaque paramètre sur le fonctionnement de ce convertisseur. ■

Question 3.2 Calculer les paramètres pour avoir :

- une tension de sortie $V_{\text{out}} = 40 \text{ V}$, un courant de sortie $I_{\text{out}} = 0,6 \text{ A}$,
 - une ondulation $\Delta i_{\text{out}} = 10\%$ à la fréquence $f_{\text{sw}} = 1 \text{ kHz}$.
-

Question 3.3 Régler les valeurs trouvées à la question précédente. Mesurer V_{out} , I_{out} et Δi_{out} . Déterminer le rendement du montage à ce point de fonctionnement. ■



2. Onduleur monophasé — Partie 1

Objectifs et pré-requis

Cette séance a pour objectifs :

- de différencier les différents montages onduleurs, de donner leurs caractéristiques principales, les avantages, les inconvénients, les contraintes de chaque solution,
- de réaliser une analyse harmonique sur le courant.

Les pré-requis sont :

- l'étude d'un hacheur simple,
- l'étude théorique de l'onduleur monophasé,
- l'utilisation d'un oscilloscope,
- les mesures physiques de courant et de tension.

Introduction

Un onduleur est un *convertisseur statique* continu vers alternatif. On le trouve, par exemple, dans les alimentations de secours qui permettent de pallier les pannes accidentelles de courant dans les installations. Chacun peut s'en procurer un pour alimenter un appareil domestique. Également, certaines voitures particulières proposent aujourd'hui en option une prise 220 V : la conversion de la batterie continue 12 V vers l'alternatif 220 V est réalisée par un onduleur. Ces dernières années, les onduleurs triphasés ont pris une importance considérable dans le contrôle des machines à courant alternatif, notamment pour la variation de vitesse.

Les qualités d'un bon onduleur sont un rendement élevé, un courant de charge proche d'une sinusoïde, et dans certains cas, une fréquence et une tension de sortie réglables.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

Le principe de fonctionnement repose sur la cellule de commutation déjà étudiée dans le premier TP sur le hacheur abaisseur, alimentant une charge. La tension fournie est alors *alternative*, mais non *sinusoïdale* : il s'agit d'une succession de créneaux. C'est la charge elle-même qui filtre la tension.

On distingue trois stratégies :

1. *pleine onde* : le rapport cyclique est fixe et vaut 0,5,
2. *résonant* : la charge résonne à la fréquence d'alimentation,
3. *modulation de largeur d'impulsions (MLI)* : le rapport cyclique varie de manière sinusoïdale au cours du temps.

1 Préparation à faire avant la séance

1.1 Analyse harmonique — Rappel

On rappelle que si $x(t)$ est une fonction impaire et périodique de période T , alors la *décomposition en série de Fourier* de $x(t)$ permet d'écrire :

$$x(t) = \sum_{h=1}^{\infty} X_h \sin(h\omega t) \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

On appelle h le *rang* de l'harmonique ($h > 1$) et X_h l'*amplitude* de l'harmonique de rang h .

Question 1.1 Rappeler la définition du taux de distorsion harmonique. ■

1.2 Fonctionnement de l'onduleur pleine onde

On considère le montage de la figure 2.1(a), pour laquelle les interrupteurs K_1 et K_2 sont commandés selon les chronogrammes de la figure 2.1(b).

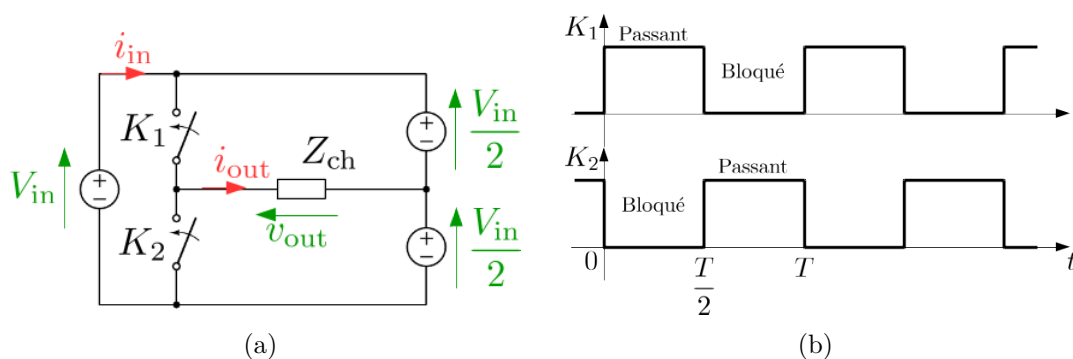


Fig. 2.1 — (a) : Schéma de principe d'un onduleur de tension
(b) : Chronogramme des ordres de commande des interrupteurs en fonctionnement pleine onde

Question 1.2 Tracer la forme d'onde de la tension v_{out} en fonction du temps. ■

Question 1.3 Comment règle-t-on la fréquence de sortie de l'onduleur ? ■

Question 1.4 Calculer la décomposition en série de Fourier de la tension v_{out} . Donner, en fonction de V_{in} , la valeur efficace du fondamental et des trois premiers harmoniques. ■

Question 1.5 La charge Z_{ch} est constituée d'une charge RL série. Donner l'expression de la transmittance Y_h de la charge à la pulsation $h\omega$ en fonction du rang h de l'harmonique considéré, de L , de R et de ω . ■

Question 1.6 Donner la relation liant Y_h , V_h et I_h . ■

Question 1.7 En déduire, en fonction de V_{in} , de ω , de L et de R , la valeur numérique de l'amplitude du fondamental et des trois premiers harmoniques. ■

Question 1.8 Le courant est-il purement sinusoïdal ? ■

Question 1.9 Dans la pratique, comment sont réalisées les deux sources de tension $\frac{V_{\text{in}}}{2}$? ■

2 Manipulations

2.1 Préliminaires

Question 2.1 Régler la résistance de charge à une valeur de 50Ω . ■

R On indiquera sur les relevés expérimentaux les intervalles de conduction des différents composants (diodes, transistors...).

R Les oscilloscopes de la salle de TP disposent de la fonction *FFT* (*Fast Fourier Transform* ou transformation de Fourier rapide), qui permet le calcul de la transformée de Fourier des grandeurs mesurées. Elle permettra de caractériser la richesse harmonique du courant de charge.

2.2 Onduleur fonctionnant en pleine onde débitant sur une charge RL

Le schéma de la manipulation est donné en figure 3.2. On réglera $L_{\text{ch}} = 500 \text{ mH}$. L'association de L_{ch} et R_{ch} en série forme l'impédance de charge, notée Z_{ch} dans la préparation.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

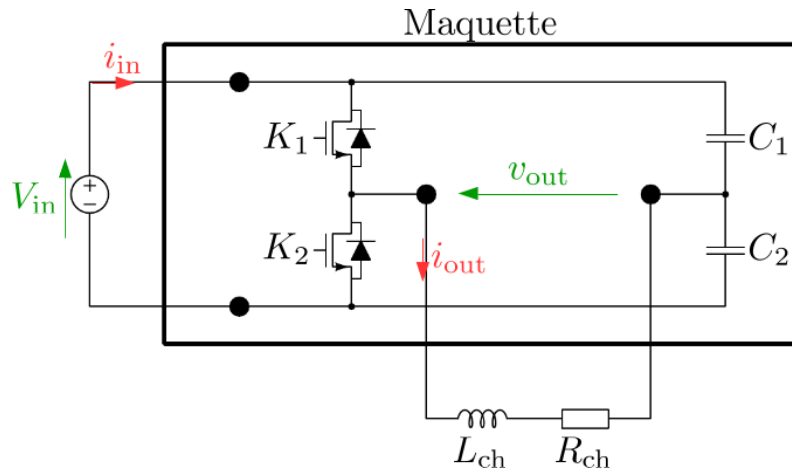


Fig. 2.2 — Schéma de principe de la maquette utilisée pour la manipulation

Question 2.2 Réaliser le câblage de la maquette selon la figure 3.2, en incluant les appareils pour la mesure de V_{in} , I_{in} , des valeurs efficaces de V_{out} , I_{out} , ainsi que la visualisation de v_{out} et i_{out} . ■

Question 2.3 Visualiser la tension v_{out} et le courant i_{out} . Indiquer les intervalles de conduction de chaque élément (diodes et transistors). Comment régler la fréquence de sortie. ■

Question 2.4 Relever à l'oscilloscope la décomposition en série de Fourier de la tension. Comparer aux résultats théoriques de la préparation. ■

Question 2.5 Calculer la décomposition en série de Fourier du courant. Comparer aux résultats théoriques de la préparation.
Le courant est-il sinusoïdal ? Donner le taux de distorsion harmonique. ■

3 Conclusion

Question 3.1 Résumer le fonctionnement de ce montage, avec ses avantages, ses inconvénients, ses contraintes, la qualité du signal de sortie, la simplicité de mise en œuvre... ■



3. Onduleur monophasé — Partie 2

Objectifs et pré-requis

Cette séance a pour objectifs :

- de différencier les différents montages onduleurs, de donner leurs caractéristiques principales, les avantages, les inconvénients, les contraintes de chaque solution,
- de réaliser une analyse harmonique sur le courant.

Les pré-requis sont :

- l'étude d'un hacheur simple,
- l'étude théorique de l'onduleur monophasé,
- l'utilisation d'un oscilloscope,
- les mesures physiques de courant et de tension.

Introduction

Un premier principe de montage onduleur a été étudié lors du TP précédent. Ce circuit est simple de mise en œuvre, mais le courant de sortie présente de nombreux harmoniques, donc d'importantes pertes. Il existe des solutions pour réduire ces harmoniques et rendre le signal davantage sinusoïdal. Bien évidemment, plus ces solutions seront simples à mettre en place, plus les contraintes sur la charges seront importantes.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

1 Préparation à faire avant la séance

1.1 Fonctionnement de l'onduleur résonant

Il s'agit dans cette partie de faire résonner la charge afin de rendre le courant qui la traverse davantage sinusoïdal.

Question 1.1 Comment obtenir un courant sinusoïdal à partir d'une tension en créneaux telle que celle du TP précédent ? ■

Question 1.2 Pour une charge RL composée d'une résistance $R_{ch} = 50 \, \Omega$ et d'une inductance $L_{ch} = 500 \, \text{mH}$, calculer la valeur de la capacité série à ajouter pour obtenir une résonance à 50 Hz. ■

Question 1.3 Quelle va être la principale contrainte pour ce mode de fonctionnement ? ■

1.2 Onduleur fonctionnement en MLI

Question 1.4 Expliquer le principe de fonctionnement de la Modulation de Largeur d'Impulsion. ■

Question 1.5 Quelle fréquence la charge va-t-elle voir en sortie ? Comment régler cette fréquence ? ■

Question 1.6 Quel est l'intérêt de moduler en haute fréquence ? ■

2 Manipulations

2.1 Préliminaires

Question 2.1 Régler la résistance de charge à une valeur de $50 \, \Omega$. ■

R On indiquera sur les relevés expérimentaux les intervalles de conduction des différents composants (diodes, transistors...).

R Les oscilloscopes de la salle de TP disposent de la fonction *FFT* (*Fast Fourier Transform* ou transformation de Fourier rapide), qui permet le calcul de la transformée de Fourier des grandeurs mesurées. Elle permettra de caractériser la richesse harmonique du courant de charge.

2.2 Onduleur fonctionnant en pleine onde débitant sur une charge résonante RLC

Afin de rendre le courant davantage sinusoïdal, on décide de faire résoner la charge à une fréquence de 50 Hz, en plaçant un condensateur en série. Le schéma de la manipulation est donné en figure 3.1. On réglera $L_{ch} = 500 \, \text{mH}$.

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

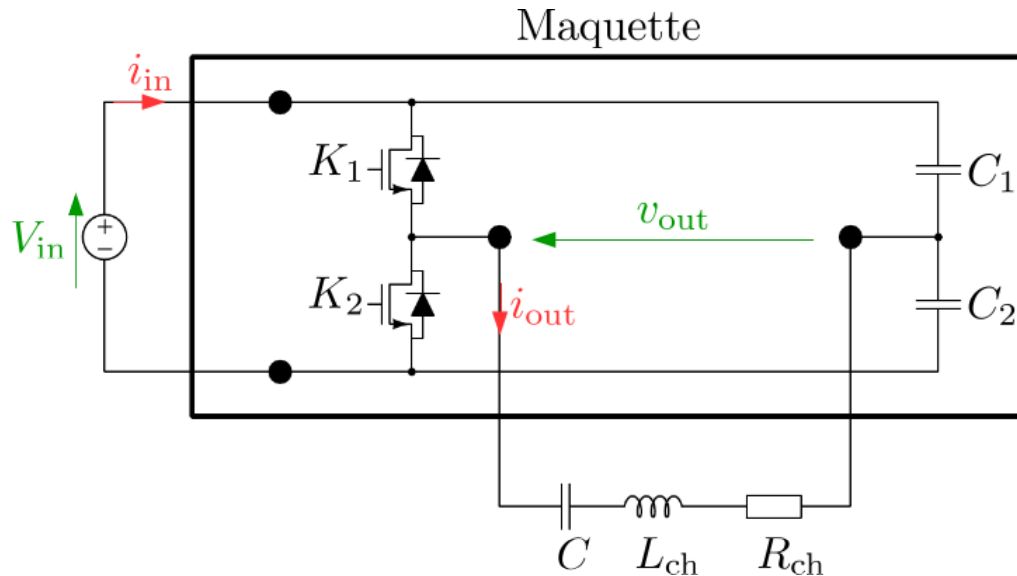


Fig. 3.1 – Schéma de principe de la maquette utilisée pour la manipulation de l'onduleur fonctionnant en pleine onde et débitant sur une charge résonante RLC

Question 2.2 Réaliser le câblage de la maquette selon la figure 3.2, en incluant les appareils pour la mesure de V_{in} , I_{in} , des valeurs efficaces de V_{out} , I_{out} , ainsi que la visualisation de v_{out} et i_{out} . ■

Question 2.3 Visualiser la tension v_{out} et le courant i_{out} . Indiquer les intervalles de conduction de chaque élément (diodes et transistors). Comment régler la fréquence de sortie. ■

Question 2.4 Le courant de sortie est-il sinusoïdal ? Justifier en relevant à l'oscilloscope la décomposition en série de Fourier de la tension. En déduire le rôle joué par le condensateur C et la charge RLC dans son ensemble. ■

Question 2.5 Quelle est la phase entre la tension v_{out} et le courant i_{out} . Justifier vos observations. ■

2.3 Onduleur fonctionnant en MLI

La modulation de largeur d'impulsion fonctionne sur une charge RL , selon le montage de la figure 3.2. La maquette dispose d'un commutateur pour choisir le fonctionnement « MLI » plutôt que pleine onde (« PO »). L'inductance de charge L_{ch} est réglée à 500 mH.

Question 2.6 Réaliser ce montage, en y ajoutant les instruments de mesure et de visualisation des grandeurs v_{out} , i_{out} , V_{out} et I_{out} . ■

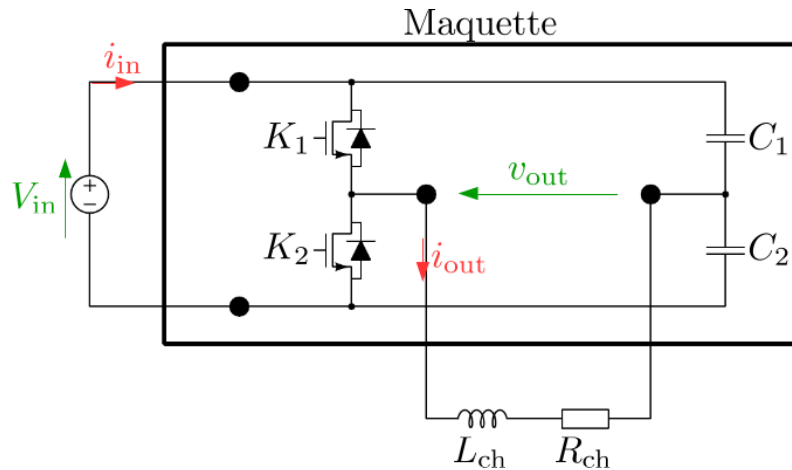


Fig. 3.2 — Schéma de principe de la maquette utilisée pour la manipulation

Question 2.7 Pour $f = 500$ Hz, relever v_{out} et i_{out} .

Comment évolue le rapport cyclique de la cellule de commutation $K_1 K_2$?

Question 2.8 Relever v_{out} et i_{out} pour f variant de 500 Hz à 5 kHz.

Quelle fréquence règle-t-on à l'aide du potentiomètre ?

Question 2.9 Pour $f = 500$ Hz, relever la transformée de Fourier du courant i_{out} .

Comparer avec $f = 5$ kHz. Le courant est-il davantage sinusoïdal ? Expliquer pourquoi.

Question 2.10 Comparer les résultats fréquentiels avec ceux de l'onduleur fonctionnant en pleine onde sur charge RL .

Question 2.11 Calculer le taux de distorsion harmonique. Pourquoi le courant est-il plus sinusoïdal ?

3 Conclusion

Question 3.1 À partir des résultats collectés lors de ces deux séances, résumer (par exemple sous forme de tableau) les principales caractéristiques de chaque fonctionnement de l'onduleur (qualité du courant sinusoïdal, adaptation à la charge, encombrement, réglage de la fréquence...). Vous pourrez utiliser des qualificatifs comme « bon », « moyen », « difficile »...



4. Redresseur monophasé — Partie 1

Introduction et objectifs

Cette séance a pour objectif l'étude de différents redresseurs monophasés à diodes, réalisant une conversion alternatif-continu :

- redresseur simple alternance à une diode,
- redresseur simple alternance avec une diode de roue libre (deux diodes) ,
- redresseur double alternance à quatre diodes, aussi appelé *pont de Graetz* ou *pont complet*.

Les deux premières configurations sont très peu utilisées en pratique, mais permettent de mieux comprendre le principe des redresseurs de puissance et des échanges d'énergie entre la source alternative et la charge. La troisième configuration est la plus utilisée : très bon marché, simple, robuste et fiable, ces montages sont utilisés dès qu'il s'agit de réaliser la conversion (non-réversible en puissance) d'une tension alternative vers une tension continue. On la trouve :

- sur de nombreux variateurs de vitesse,
- en tête de toutes les alimentations à découpage alimentant des systèmes électroniques (ordinateurs, chargeurs de smartphone, écrans, machines à laver...)

1 Préparation à faire avant la séance

On considère tout d'abord le montage de la figure 4.1. La tension v_{out} , de valeur moyenne V_{out} , alimente une charge RL .

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

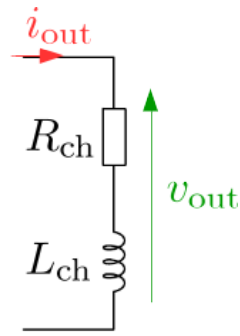


Fig. 4.1 — Tension et courant dans une charge RL

Question 1.1 Montrer, en régime établi, que la valeur moyenne I_{out} du courant i_{out} ne dépend que de V_{out} et de R_{ch} . ■

On se propose à présent d'étudier les deux montages des figures 4.2(a) et 4.2(b). Ces deux montages sont alimentés par une tension sinusoïdale v_{in} , de valeur efficace V_{in} et de fréquence f .

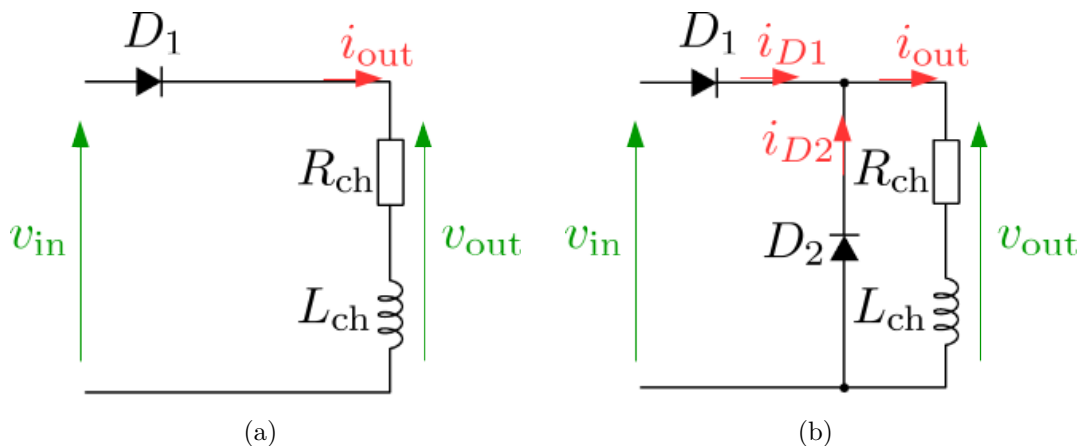


Fig. 4.2 — (a) : Schéma de principe d'un redresseur simple alternance
(b) : Schéma de principe d'un redresseur à diode de roue libre

Question 1.2 Rappeler les conditions de conduction et de blocage d'une diode. ■

Question 1.3 Pour chacun des montages des figures 4.2(a) et 4.2(b), donner l'allure du courant i_{out} en sortie, et du courant i_{D1} en entrée.

Indiquer sur ces courbes les intervalles de conduction des diodes. ■

Question 1.4 Donner l'expression de la valeur moyenne V_{out} de la tension de sortie v_{out} pour chacun des montages. ■

**Toujours faire vérifier les montages par l'enseignant
AVANT de mettre sous tension**

2 Manipulations

2.1 Préliminaires

Question 2.1 Régler la résistance de charge à une valeur de $50\ \Omega$. ■

R On indiquera sur les relevés expérimentaux les intervalles de conduction des différentes diodes

2.2 Étude du redressement simple alternance

On considère le circuit le circuit présenté en figure 4.3. On règle l'inductance $L_{ch} = 1\ \text{H}$.

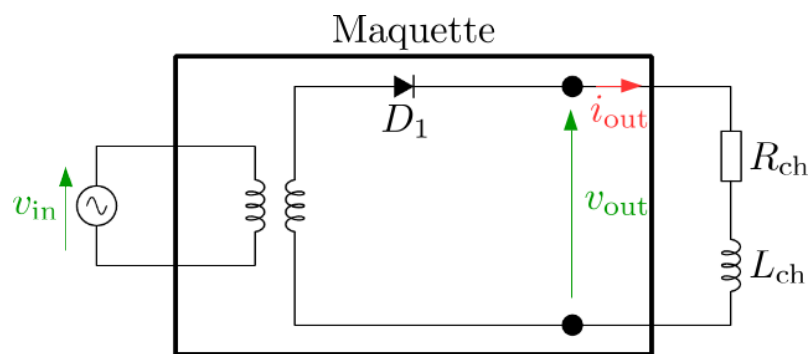


Fig. 4.3 – Maquette permettant le redressement simple alternance

Question 2.2 Câbler le montage de la figure 4.3, y compris les appareils de mesure pour relever les formes d'ondes de la tension et du courant de sortie v_{out} et i_{out} . ■

Question 2.3 Expliquer pourquoi la tension devient négative. ■

Question 2.4 Expliquer l'évolution de la tension moyenne de sortie V_{out} en fonction de L_{ch} .

Justifier les variations du rapport $\frac{V_{out}}{I_{out}}$ en fonction de L_{ch} . ■

2.3 Étude du redressement simple alternance avec diode de roue libre

On se propose à présent d'étudier la contribution d'une diode de roue libre ajoutée au montage précédent. La configuration est présentée en figure 4.4. L_{ch} est à nouveau réglée à $1\ \text{mH}$.

Question 2.5 Réaliser le montage présenté en figure 4.4, en y ajoutant les appareils permettant la mesure et la visualisation des formes d'ondes des courants i_{D1} , i_{D2} et i_{out} .

Représenter sur les relevés les instants de conduction des diodes D_1 et D_2 . ■

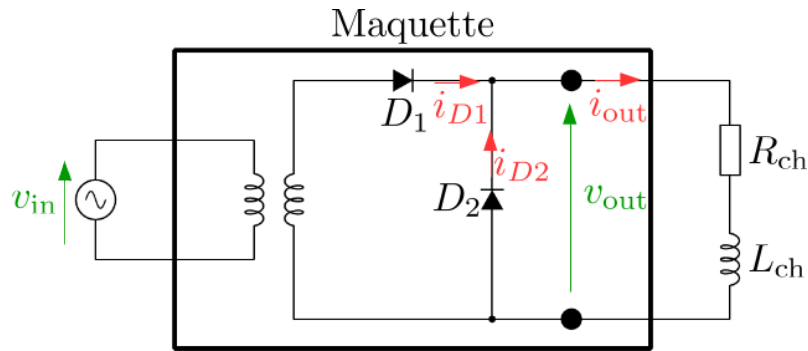


Fig. 4.4 — Maquette permettant le redressement simple alternance aidé d'une diode de roue libre

Question 2.6 Pour différentes valeurs d'inductances L_{ch} entre 0 et 1 H, relever les valeurs moyennes du courant de sortie I_{out} et de la tension de sortie V_{out} . Calculer le rapport $\frac{V_{out}}{I_{out}}$. ■

Question 2.7 Comparer et commenter les résultats avec ceux du montage précédent. En déduire l'intérêt de la diode de roue libre. ■

Question 2.8 Observer le courant d'entrée (après le transformateur). Quel est l'inconvénient majeur de ces deux configurations de redresseur à diodes ? ■

3 Conclusion

Question 3.1 Résumer de manière synthétique les avantages et inconvénients des deux montages de redresseurs à diodes vu lors de cette séance. Quelle solution peut-on envisager pour compenser les inconvénients de ces montages ? ■

5. Redresseur monophasé — Partie 2

Introduction et objectifs

Il existe trois types de différents redresseurs monophasés à diodes, réalisant une conversion alternatif-continu :

- redresseur simple alternance à une diode,
- redresseur simple alternance avec une diode de roue libre (deux diodes) ,
- redresseur double alternance à quatre diodes, aussi appelé *pont de Graetz* ou *pont complet*.

Les deux premières configurations ont été étudiées lors de la séance précédente, mettant en évidence leurs inconvénients. La séance d'aujourd'hui consiste à étudier la dernière configuration, à quatre diodes. Nous verrons comment cette configuration compense les défauts des deux premières, et nous analyserons ses avantages et inconvénients.

1 Préparation à faire avant la séance

Le schéma d'un redresseur double alternance en pont complet est donné en figure 5.1. Ce montage est alimenté par une tension sinusoïdale v_{in} , de valeur efficace V_{in} et de fréquence f .

Question 1.1 Rappeler les conditions de conduction et de blocage d'une diode. ■

Question 1.2 Donner l'allure du courant i_{out} en sortie , et du courant i_{D1} en entrée. Indiquer sur ces courbes les intervalles de conduction des diodes. ■

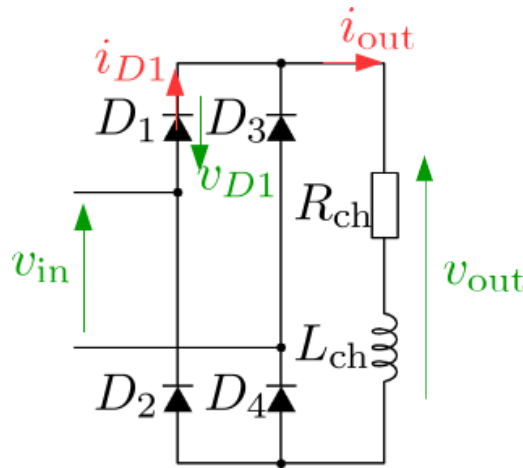


Fig. 5.1 — Maquette permettant le redressement double alternance en pont de Graetz

Question 1.3 Donner l'expression de la valeur moyenne V_{out} de la tension de sortie v_{out} pour chacun des montages. ■

Question 1.4 Calculer le facteur de puissance à l'entrée du montage pour une charge purement résistive ($L_{ch} = 0$), puis pour une charge fortement inductive (ce qui implique $i_{out} = cste$). ■

Question 1.5 Montrer comment calculer le facteur de puissance à partir des mesures de I_{out} , $I_{out-eff}$, V_{out} et $V_{out-eff}$. ■

2 Manipulations

2.1 Préliminaires

Question 2.1 Régler la résistance de charge à une valeur de 50Ω . ■

R On indiquera sur les relevés expérimentaux les intervalles de conduction des différents diodes

2.2 Étude du redressement double alternance sur charge RL

On considère le circuit le circuit présenté en figure 5.2. On règle l'inductance $L_{ch} = 1 \text{ H}$.

Question 2.2 Câbler le montage de la figure 5.2, y compris les appareils de mesure permettant de relever les formes d'ondes de la tension et du courant de sortie v_{out} , v_{D1} , i_{D1} , et i_{out} . ■

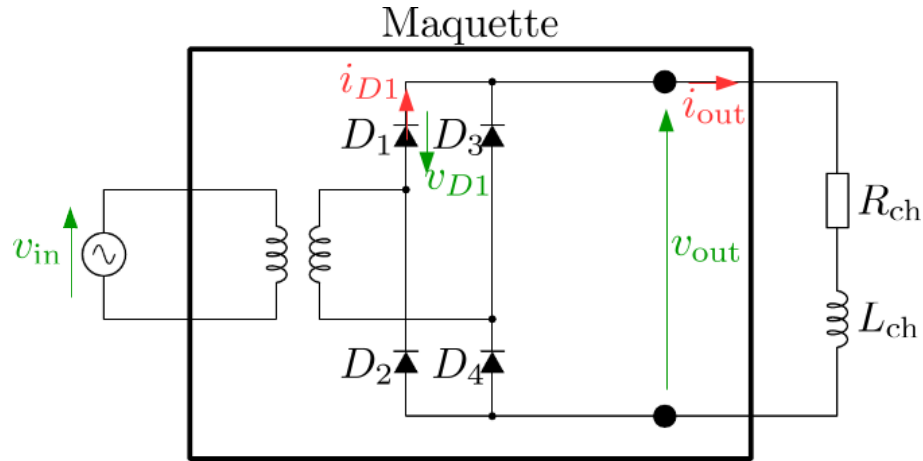


Fig. 5.2 — Maquette permettant le redressement double alternance en pont complet

Question 2.3 Pour différentes valeurs de L_{ch} entre 0 et 1 H, relever les valeurs moyennes du courant de sortie I_{out} et de la tension de sortie V_{out} . ■

Question 2.4 Dédurre, pour chaque valeur de L_{ch} , la valeur efficace du courant d'entrée I_{in-eff} , la valeur de la puissance de sortie (les pertes des composants seront négligées et on supposera le rendement unitaire), et le facteur de puissance. ■

2.3 Débit sur charge RC

Nous allons à présent étudier une solution de lissage de la tension de sortie. Pour cela, le courant ne sera plus lissé par l'inductance de la charge (la bobine sera retirée), et un condensateur sera ajouté en parallèle de la sortie. Le montage est présenté en figure 5.3. La capacité sera réglée sur 1 000 μF .

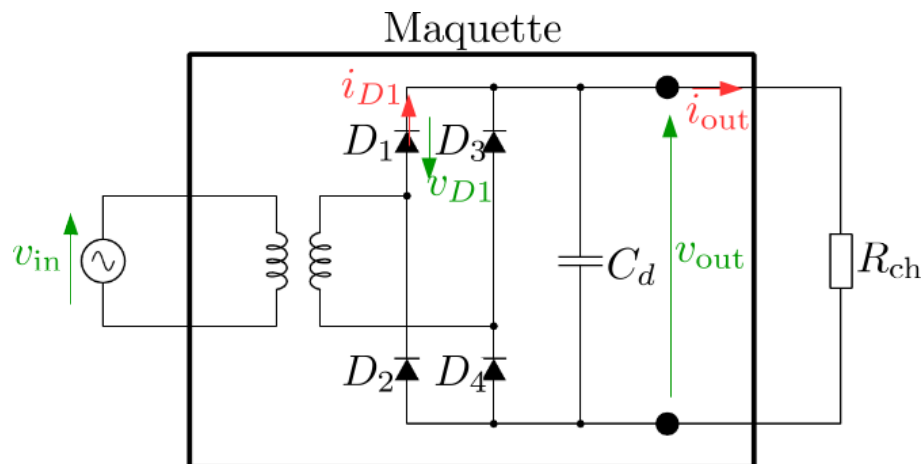


Fig. 5.3 — Maquette permettant le redressement double alternance fournissant une tension de sortie constante

Question 2.5 Réaliser le montage présenté en figure 4.4, en y ajoutant les appareils permettant la mesure et la visualisation des formes d'ondes du courant d'entrée i_{in} (après le transformateur) et de la tension de sortie v_{out} , du courant dans le condensateur i_{Cd} et dans la résistance i_{Rch} .

Représenter sur les relevés les instants de conduction des diodes. ■

Question 2.6 Expliquer la forme d'onde du courant d'entrée i_{in} .

Que peut-on dire de la valeur moyenne du courant dans le condensateur I_{Cd} ? ■

Question 2.7 Relever la valeur moyenne de la tension de sortie V_{out} pour $C_d = 1\,000\,\mu\text{F}$ puis pour $C_d = 10\,000\,\mu\text{F}$.

Quelle est la valeur limite que peut atteindre cette tension? ■

Question 2.8 Pour $C_d = 10\,000\,\mu\text{F}$, mesurer les valeurs efficaces du courant d'entrée I_{in-eff} , de la tension d'entrée V_{in-eff} (après le transformateur), et du courant dans la résistance $I_{Rch-eff}$.

En déduire le facteur de puissance. Comparer au facteur de puissance *sans* le condensateur de découplage. ■

3 Conclusion

Question 3.1 Conclure quant à l'efficacité des montages redresseurs, en fonction de la qualité du signal de sortie, du nombre de composants, du courant circulant dans les composants. . . ■

