
REDRESSEMENT MONOPHASE A ABSORPTION SINUS

OBJECTIFS DE LA MANIPULATION

Les appareils électriques de la classe D (micro-ordinateurs, électroménager, HIFI,...) nécessitent une alimentation continue de leur électronique de commande. Comme la source d'énergie primaire est le réseau monophasé, un premier étage de conversion alternatif/continu est nécessaire. La solution traditionnelle est celle de la Figure 1. Le post-régulateur est souvent à découpage et assure aussi l'isolement électrique : les structures couramment utilisées sont les convertisseurs flyback et forward.

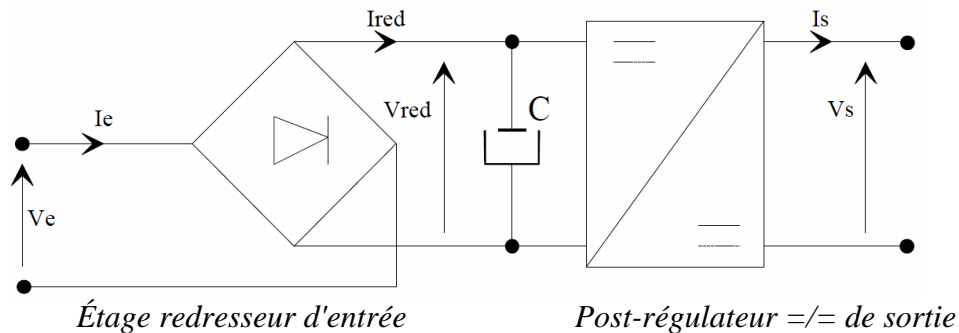


Figure 1 : Alimentation \sim/\equiv conventionnelle

Si la présence du condensateur C de filtrage réduit l'ondulation de la tension secteur redressée, il réduit également l'angle de conduction des diodes, amenant le courant secteur I_e à une allure impulsionnelle. Ce courant distordu induit de nombreux inconvénients ; on citera :

- une distorsion locale de la tension réseau V_e à travers les impédances de ligne,
- une augmentation des pertes en lignes,
- un mauvais facteur de puissance,
- un surdimensionnement des transformateurs de distribution,
- un vieillissement accéléré des condensateurs de compensation de réactif éventuellement présents sur le réseau BT.

Depuis janvier 2001, la norme CEI 61000-3-2 (voir annexe 2) s'applique aux appareils électriques et électroniques ayant un courant d'entrée dont la valeur est inférieure ou égale à 16 A par phase et qui sont destinés à être raccordés à des réseaux publics de distribution à basse tension. Elle définit les limites des harmoniques du courant d'entrée qui peuvent être produits par ces appareils. La structure de la Figure 1 ne satisfait pas à cette norme.

Ce TP a pour but d'étudier en simulation le fonctionnement d'un étage d'entrée redresseur dit "à absorption sinus", et de calculer les éléments constitutifs. Cet étage est communément nommé PFC (pour "Power Factor Correction" ou "Power Factor Controller"). A l'issue de la manipulation, (et après consultation des cours et TD ...), l'étudiant doit savoir aborder ou traiter les points suivants :

- Principe de la norme CEI 61000-3-2,
- Utilisation du logiciel de simulation PSIM[®],
- Redresseur PD2 et filtrage,
- Analyse spectrale par FFT,
- Hacheur parallèle, convertisseur élévateur de tension et éléments de dimensionnement,
- Commande par fourchette de courant (hystérésis),
- Modulation d'amplitude.

MATERIEL MIS À DISPOSITION

- Un ordinateur avec le logiciel PSIM®

RECOMMANDATIONS

Il est impératif de préparer ce TP. De nombreux calculs et démonstrations peuvent être effectuées au préalable.

|| Le travail de manipulation et d'exploitation à réaliser durant la séance est identifié par un trait double sur la partie gauche du texte (tel que pour cette phrase).

Un utilitaire de copie de zone d'écran est à votre disposition pour sauver schémas, graphiques et courbes : prévoir une clé USB pour sauvegarder les fichiers.

MANIPULATION

1 - CAHIER DES CHARGES DE BASE

Globalement, on souhaite étudier un convertisseur AC/DC monophasé répondant aux spécifications suivantes :

- Source de tension d'entrée sinusoïdale (15 V / 50 Hz),
- Puissance 70 W.

Les autres éléments du cahier des charges seront précisés au fur et à mesure du TP.

2 - REDRESSEMENT MONOPHASE CLASSIQUE

2-1 Modèle de la source d'entrée réelle

La tension efficace à vide de la source est de 15 V.

- Déterminer le courant efficace nominal de la source.

Sur charge purement résistive réglable, la tension de la source en charge vaut 14,3 V à courant nominal.

Sur charge purement inductive réglable, la tension de la source en charge vaut 14,7 V à courant nominal.

- Déterminer le modèle de Thévenin de la source réelle. On rappellera l'approximation effectuée.

2-2 Montage avec condensateur en tête

- Charger le fichier " Red class.sch" dans PSIM®. Le schéma structurel fournit par PSIM® est représenté sur la Figure 2.

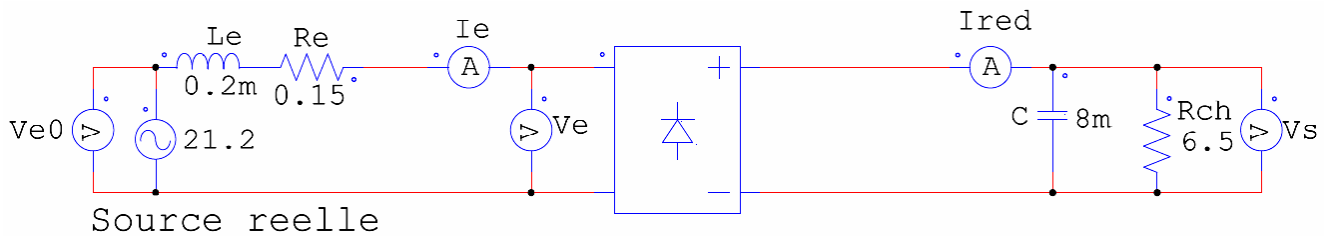


Figure 2 : Redressement classique

La résistance de sortie est réglée à $6,5 \Omega$.

- En supposant une source idéale, et que le redresseur fonctionne à puissance nominale, déterminer la valeur du condensateur de sortie pour obtenir une ondulation résiduelle de 17 %.

- Observer les différents courants et tensions à diverses échelles de temps et commenter. Expliquer en particulier l'origine des différences entre V_{e0} et V_e .

Spectre du courant d'entrée :

- Effectuer une simulation sur 400 ms et tracer le courant d'entrée I_e . Appliquer la fonction FFT de PSIM[®] et tracer le spectre de I_e en coordonnée logarithmique pour l'axe des fréquences, sur une plage de 10 Hz à 1 kHz. Commenter.

Facteur de puissance à l'entrée :

- Ajouter au modèle de simulation un wattmètre et un ampèremètre RMS à l'entrée du redresseur.
- Effectuer une simulation pour évaluer le facteur de puissance à l'entrée du redresseur. Commenter.
- Que vaut la puissance moyenne en sortie ? Commenter.

2-3 Montage avec filtre LC

- Charger le fichier "Red filtre LC.sch" dans PSIM[®]. Le schéma structurel fournit par PSIM[®] est représenté sur la Figure 2.

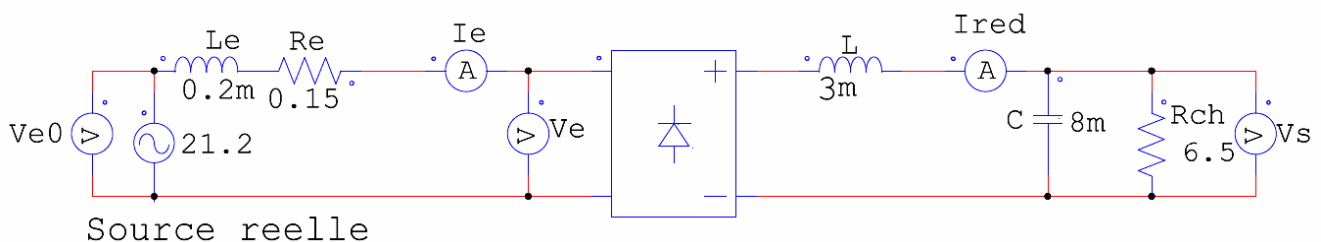


Figure 3 : Redressement classique avec filtre LC

- Pour plusieurs valeurs de l'inductance L (3 mH, 30 mH), observer les différents courants et tensions à diverses échelles de temps et commenter et comparer au cas précédent.
- Pour $L = 3$ mH régler la résistance en sortie pour obtenir la même puissance que celle obtenu dans le cas précédent (2-2). On utilisera cette résistance pour la suite.

Spectre du courant d'entrée :

- Pour $L = 3 \text{ mH}$, effectuer une simulation sur 400 ms et tracer le courant d'entrée I_e . Appliquer la fonction FFT de PSIM[®] et tracer le spectre de I_e en coordonnée logarithmique pour l'axe des fréquences, sur une plage de 10 Hz à 1 kHz. Commenter et comparer au cas précédent (2-2).

Facteur de puissance à l'entrée :

- Pour $L = 3 \text{ mH}$, effectuer une simulation pour évaluer le facteur de puissance à l'entrée du redresseur. Commenter et comparer au cas précédent (2-2).

3 - REDRESSEMENT MONOPHASE A ABSORPTION SINUSOÏDALE

3-1 Principe - Calcul de L

Afin d'améliorer le facteur de puissance et de diminuer la distorsion de courant à l'entrée du redresseur, un hacheur parallèle est intercalé entre la bobine L et le condensateur C sur le circuit de la Figure 3. On obtient le schéma de principe de la Figure 4, qui permettra de maîtriser le courant I_{red} et par voie de conséquence I_e . On souhaitera ainsi asservir le courant d'entrée à un courant sinusoïdal en phase avec la tension V_e .

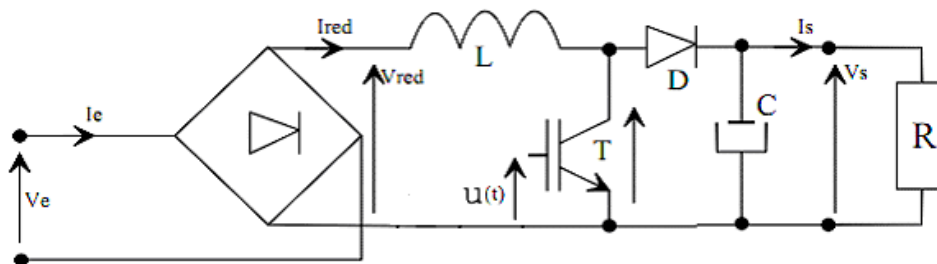


Figure 4 : Redresseur à absorption sinus

La position de l'interrupteur constitué par le transistor T est repérée par la variable u :

$u = 1$ lorsque l'interrupteur est fermé et $u = 0$ lorsqu'il est ouvert.

- Écrire l'équation différentielle vérifiée par le courant I_{red} sous la forme :

$$\frac{dI_{red}}{dt} = f(V_{red}, V_s, u) .$$

- Montrer que V_s doit être supérieur à V_{red} pour pouvoir faire croître ou décroître le courant I_{red} .

- Si on suppose que u est piloté par MLI (Fréquence de découpage F_d et rapport cyclique α), exprimer l'ondulation crête à crête Δi de I_{red} en fonction de α , V_s , L et F_d .

- Pour $V_s = 30 \text{ V}$ et $F_d = 15 \text{ kHz}$, calculer la valeur de L pour que Δi ne dépasse pas $0,5 \text{ A}$.

3-2 Fonctionnement avec une source de tension en sortie

Afin de maîtriser le courant d'entrée, on réalise une boucle de commande par hystérésis (ou encore par fourchette de courant) sur le courant I_{red} , suivant le schéma de la Figure 5. Afin de simplifier l'étude de cette boucle, on place en sortie du redresseur une source de tension constante. La largeur d'hystérésis est de $\Delta i = 0,5 \text{ A}$.

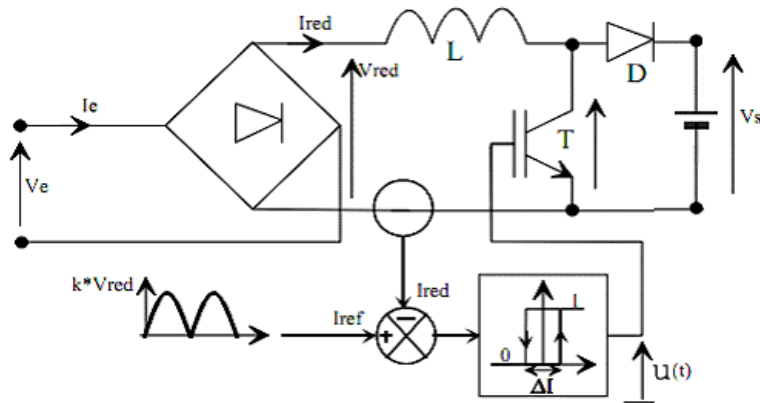


Figure 5 : Boucle de courant par hystérésis

- Proposer une méthode pour générer une référence de courant I_{ref} permettant d'obtenir un courant d'entrée sinusoïdal en phase avec la tension V_e . L'ondulation résiduelle haute fréquence sera négligée.

- Charger le fichier " PFC sur source.sch" dans PSIM[®]. Le schéma structurel fournit par PSIM[®] est représenté sur la Figure 6.
- Déterminer l'amplitude du courant d'entrée pour absorber une puissance de 60 W. Régler alors l'amplitude du courant de référence.
- Observer les différents courants et tensions à diverses échelles de temps.
- Régler V_s à 22 V et observer les modifications des courants I_e et I_{red} (en particulier au passage à zéro et autour du maximum). Commenter.

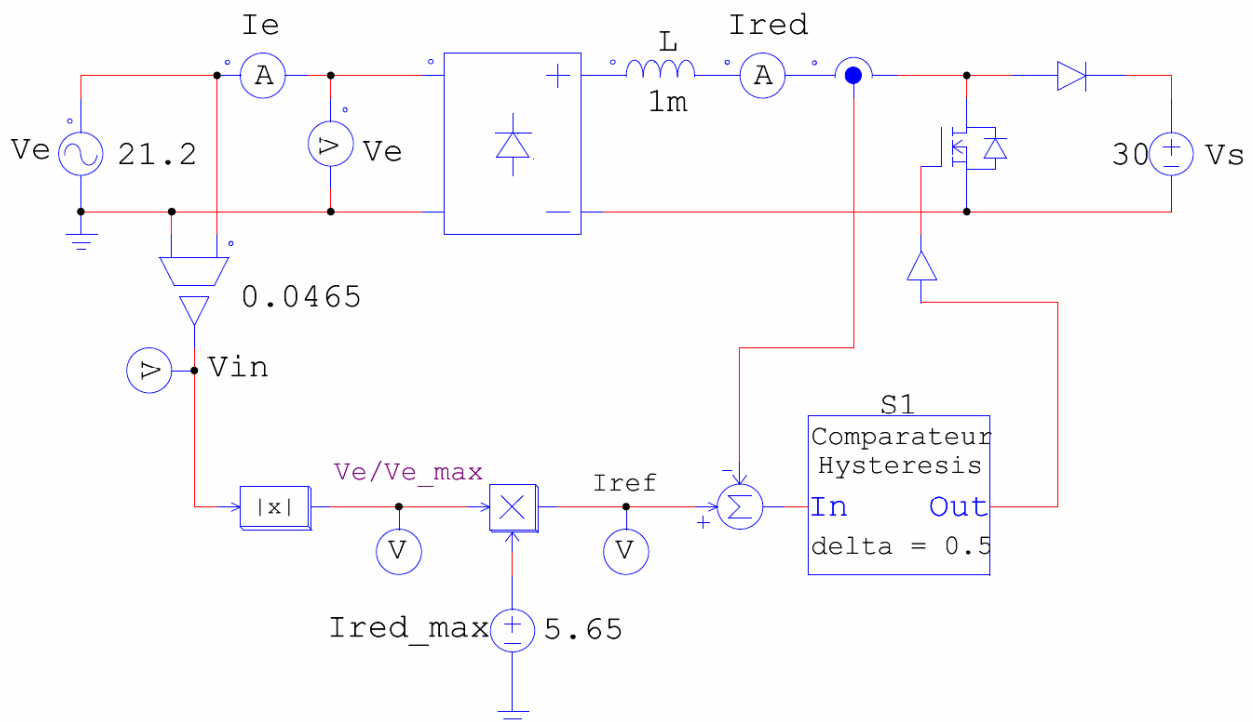


Figure 6 : PFC sur source de tension

Spectre du courant d'entrée :

- Pour $V_s = 30$ V, effectuer une simulation sur 400 ms et tracer le courant d'entrée I_e . Appliquer la fonction FFT de PSIM[®] et tracer le spectre de I_e en coordonnée logarithmique pour l'axe des fréquences, sur une plage de 10 Hz à 1 kHz. Commenter et comparer au cas précédents (2-2 et 2-3).

3-3 Fonctionnement sur condensateur et résistance

- Charger le fichier " PFC sur C R.sch" dans PSIM®. Le schéma structurel fournit par PSIM® est représenté sur la Figure 7.

On suppose que la tension est stabilisée autour de 30 V.

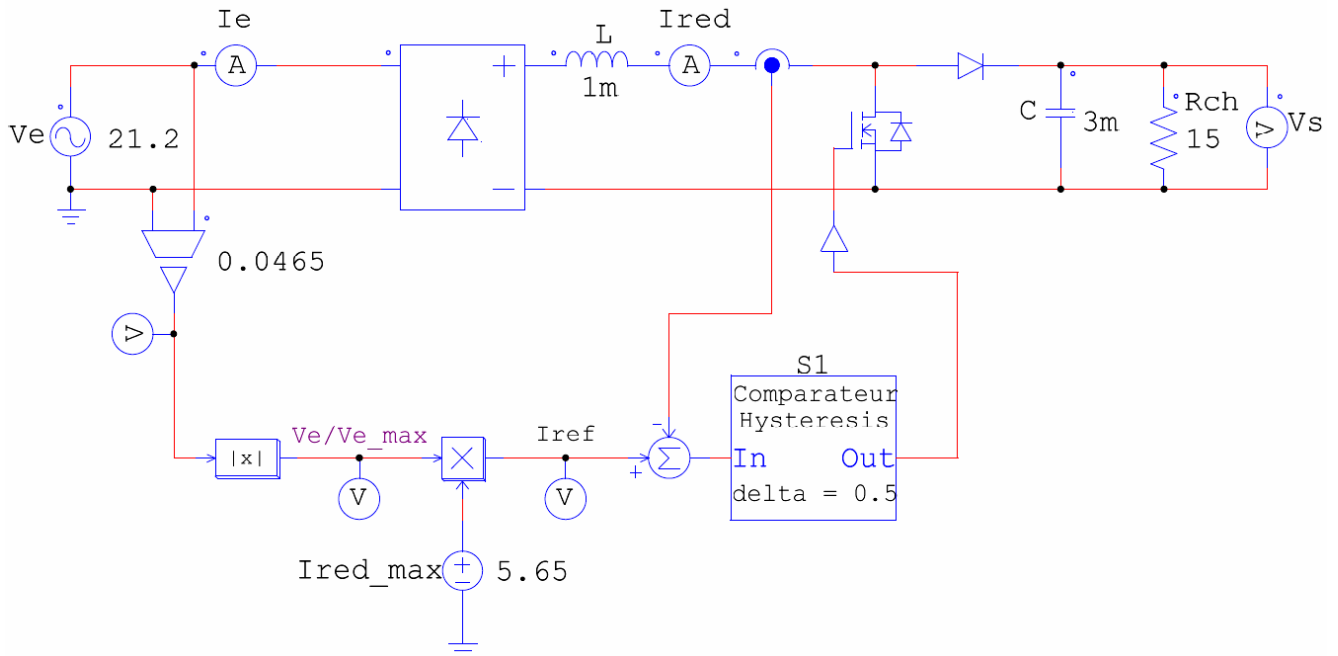


Figure 7 : PFC sur circuit CR

- L'ondulation crête à crête de la tension de sortie a pour expression (voir cours et TD) :

$$\Delta V_s = \frac{P_s}{2\pi F C V_s},$$

où P_s est la puissance de sortie et F la fréquence du réseau en entrée.

- Pour $P_s = 70 \text{ W}$ (puissance nominale) et $\Delta V_s = 2,5 \text{ V}$ (8 % de V_s), en déduire la valeur du condensateur C de sortie.

- Calculer la résistance de charge R_{ch} pour absorber en entrée une puissance de 60 W.

- Ajuster les différents paramètres et régler l'amplitude du courant de consigne. Observer alors les différents courants et tensions.

3-4 Étude de la boucle de tension

On souhaite réguler en boucle fermée la valeur moyenne de la tension de sortie à une consigne V_{ref} . La variable de commande pour cette boucle est la consigne en amplitude I_{red_max} de la boucle de courant. Après une étude en boucle ouverte, un correcteur sera proposé et réglé.

Remarque importante : La boucle de tension ne doit pas être trop rapide afin d'éviter de distordre le courant absorbé à l'entrée. Justifier cette remarque.

Étude de la réponse indicielle en boucle ouverte

On va s'intéresser à la fonction de transfert entre une variation \tilde{I}_{red_max} de I_{red_max} et une variation \tilde{V}_s de V_s (Figure 8), en négligeant l'ondulation résiduelle due au découpage ainsi que celle due à la composante à $2xF$ (100 Hz). On s'intéressera à un point de fonctionnement autour d'une tension de sortie de 30 V.

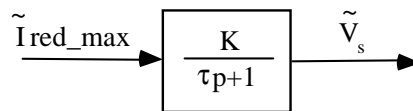


Figure 8 : Modèle en boucle ouverte pour la régulation de tension

- Au moyen d'un bilan de puissance entrée-sortie en régime permanent autour de $V_s = V_{ref}$, montrer que le gain statique K a pour expression $K = \frac{R_{ch} V_M}{4V_{ref}}$.

- Au moyen du fichier "PFC sur C R.sch" précédent, compléter le modèle afin de simuler la réponse à un échelon de 3 A sur I_{red_max} .
- On souhaite appliquer cet échelon en partant d'un courant $I_{red_max} = 3,5$ A et une tension de sortie de 25 V. Calculer la valeur de la résistance de charge qui permet d'obtenir le régime permanent au départ. Quelle sera alors la valeur finale de V_s ?
- Ajuster alors les différents paramètres et appliquer l'échelon de courant 20 ms après le début de simulation.
- Lancer une simulation sur 150 ms et observer la tension de sortie. En déduire la constante de temps τ .
- Recommencer pour le même échelon de 3 A, mais en partant d'un courant $I_{red_max} = 2$ A et une tension de sortie de 25 V.
- Vérifier que $\tau \cong \frac{R_{ch} \cdot C}{2}$.

Étude de la réponse en boucle fermée

On se propose d'étudier la réponse de la régulation de tension représentée sur la Figure 9.

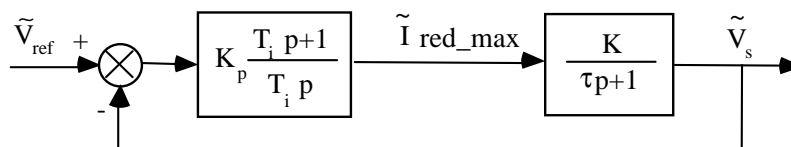


Figure 9 : Régulation de tension

- Expliquer le choix du correcteur.

- Déterminer la fonction de transfert $\frac{\tilde{V}_s(p)}{\tilde{I}_{red_max}(p)}$ lorsque la résistance de charge tend vers l'infini.

Ce cas correspond à la marche à vide théorique de l'alimentation, qui constituera le cas critique pour la stabilité en boucle fermée car la charge ne contribue pas à l'amortissement par dissipation. Le correcteur de la boucle de tension sera déterminé dans ces conditions.

- Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme :

$$\frac{\tilde{V}_s(p)}{\tilde{V}_{ref}(p)} = \frac{1 + T_i p}{1 + \frac{2z}{\omega_n} p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$$

- Exprimer Kp et Ti en fonction de ω_n et z.

- Déterminer numériquement Kp et Ti pour $\omega_n = 2\pi \cdot 25$ rd/s et $z = 0,25$. Expliquer ces choix.

- Au moyen du fichier "PFC sur C R.sch", compléter le modèle avec la régulation de tension et choisir la résistance de charge pour fonctionner à 60 W.
- Observer le comportement de la régulation de tension sur une durée de 150 ms. Commenter.

Spectre du courant d'entrée :

- Effectuer une simulation sur 500 ms en enregistrant les points qu'à partir de 100 ms (pourquoi ?) et tracer le courant d'entrée I_e . Appliquer la fonction FFT de PSIM[®] et tracer le spectre de I_e en coordonnée logarithmique pour l'axe des fréquences, sur une plage de 10 Hz à 1 kHz. Commenter et comparer au cas 2-23-2.

On souhaite diminuer la distorsion du courant d'entrée. Pour cela, déterminer numériquement Kp et Ti pour $\omega_n = 2\pi \cdot 10$ rd/s et $z = 0,25$. Expliquer ces nouveaux choix.

- Avec ce nouveau correcteur, effectuer une simulation sur 500 ms en enregistrant les points qu'à partir de 100 ms et tracer le courant d'entrée I_e . Appliquer la fonction FFT de PSIM[®] et tracer le spectre de I_e en coordonnée logarithmique pour l'axe des fréquences, sur une plage de 10 Hz à 1 kHz. Comparer au réglage précédent.

Influence de variation de charge

- Charger le fichier "PFC BF tension PI var Rch.sch" dans PSIM[®]. Le schéma structuré fournit par PSIM[®] est représenté sur la Figure 10.

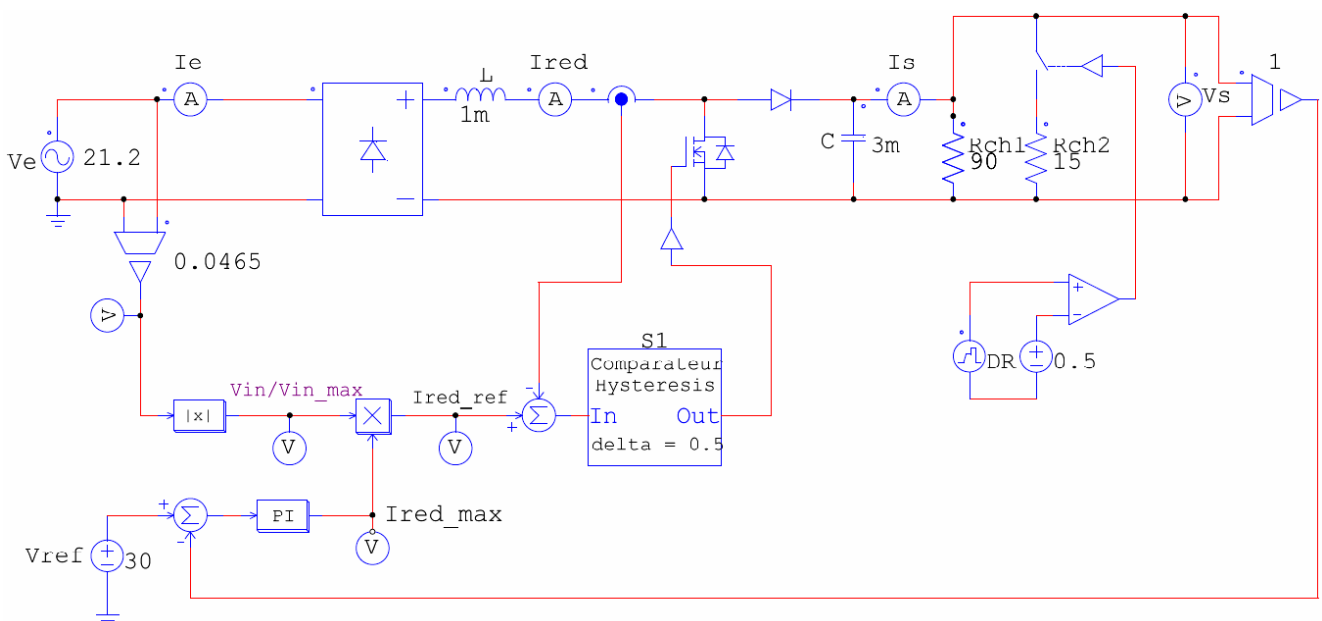


Figure 10 : Régulation de tension – variation de charge

- Expliquer comment sont effectuées les variations de charge.
 - Entre quelles valeurs de puissance commute-t-on ? Commenter.
-
- Lancer une simulation pour le dernier jeu de paramètres du correcteur utilisé et observer les différentes variables. Commenter.

* * *

Annexes

➤ Annexe 1 – INITIATION À «PSIM®»

D'après un document de Claude Lahache (<http://claude.lahache.free.fr/topic/index.html>)
Enseignant en BTS au Lycée Couffignal de Strasbourg

PSIM est un logiciel de **simulation** bien adapté à l'électrotechnique et l'électronique de puissance

Par défaut, les composants y sont idéaux, ce qui permet de se centrer sur la compréhension du fonctionnement des circuits testés.

Il est possible de réaliser des analyses temporelles (les plus fréquentes pour ce simulateur), mais également des études de réponse en fréquence (directive .ACSWEEP) ; on peut également paramétrer ces diverses analyses (directive .PARAMSWEEP)

Le logiciel est distribué par POWERSYS : <http://www.powersys.fr/>

(Une **version d'évaluation téléchargeable** est disponible sur le site du distributeur ($\approx 9\text{MO}$). Lorsque le fichier `psim70demo.zip` a été téléchargé, il faut le décompresser avant de lancer son installation par un double clic sur « `setup.exe` »)

Principe général d'utilisation : Après avoir lancé le logiciel, il faut successivement :

- Dessiner le circuit ou le système à simuler.
- Attribuer des valeurs aux composants.
- Paramétrer la simulation souhaitée.
- Lancer l'exécution.
- Exploiter les résultats (généralement sous forme graphique)

Pour illustrer cette initiation, nous choisissons le thème du redressement non commandé.

Dans un 1^{er} exemple, nous étudions un redresseur en pont (PD2). Le travail est volontairement très guidé.

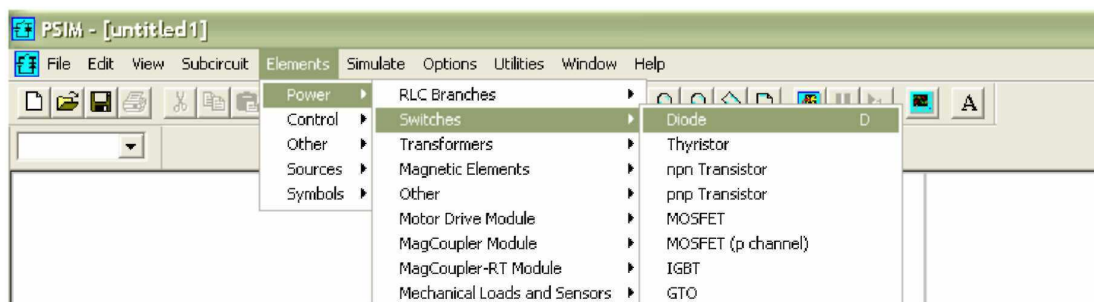
Par la suite, on propose une approche du filtrage capacitif et inductif à titre de complément.

Saisie de schéma et paramétrage.

Lancer PSIM puis choisir : « **file / new** »



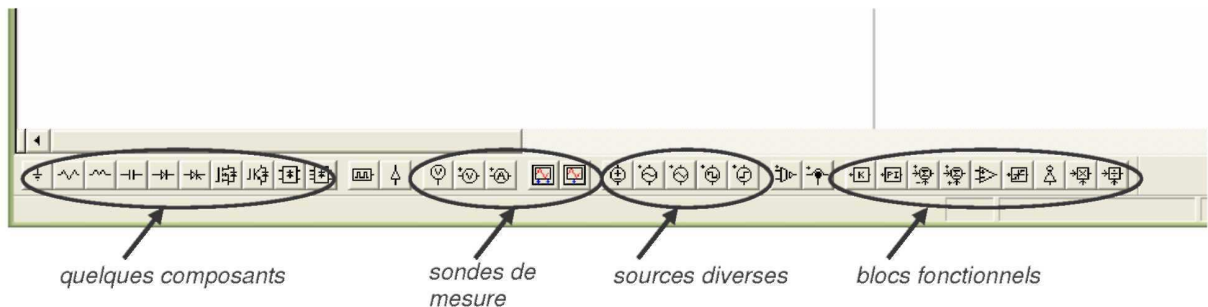
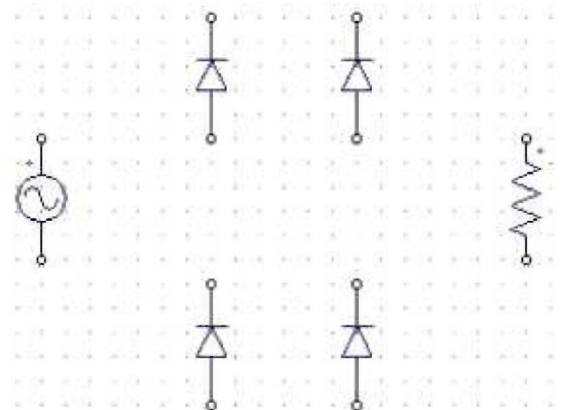
Choisir les composants : (par exemple une diode)



Les placer :

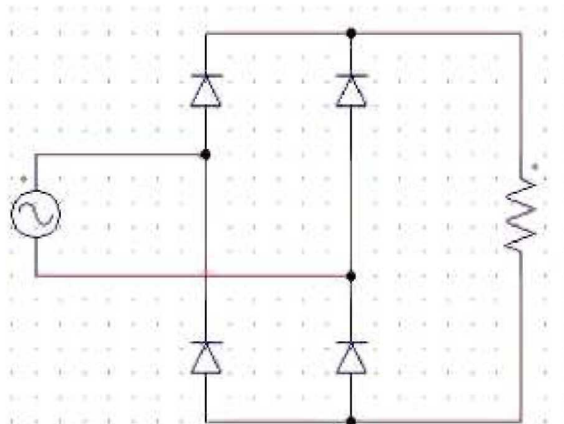
(Rotation de 90° par clic droit ; chaque clic gauche place un composant ; sortie par appui sur « échap »)

Le générateur sinusoïdal et la résistance peuvent être pris directement sur la barre d'outils du bas de la fenêtre.



Tracer les liaisons :

(« edit / wire », ou bouton adéquat)



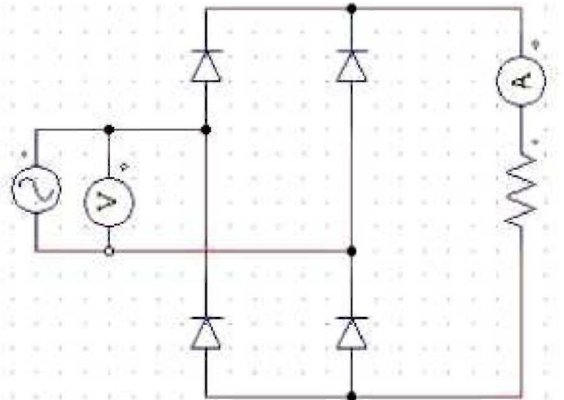
Placer des sondes de tension et (ou) de courant :

elements / other / probes / voltage probe node to node
elements / other / probes / current probe »)

(ou bien les choisir en bas de l'écran !)

On pourra par la suite changer la position et le nombre de ces sondes.

Il est possible de donner un nom (label) aux grandeurs mesurées par les sondes : Faire un double clic sur une sonde et remplir la boîte de dialogue qui s'ouvre

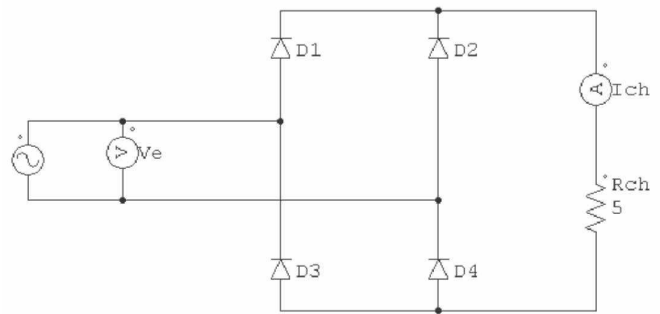


Attribuer des valeurs aux composants :

(faire un double clic sur l'élément à renseigner)

- Source : Amplitude 50V, fréquence 50Hz (attention, la fréquence par défaut est de 60Hz)
- Résistance de charge 5Ω

Dans la boîte de dialogue, il est inutile de taper l'unité, elle est implicite pour le logiciel ; on peut choisir ou non l'affichage des valeurs sur le schéma (cocher ou non la case display dans la boîte de dialogue). Voir ci-contre une vue du schéma après annotations.

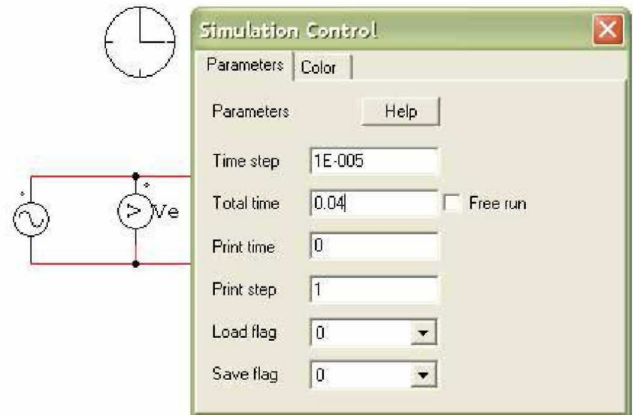


Paramétrer la simulation :

Ouvrir la boîte de dialogue du contrôle de simulation : « **simulate / simulation control** »

Choisir une durée de simulation de 40ms (total time)
Laisser les valeurs par défaut des autres paramètres pour le moment.

La version d'évaluation ne permet que 6000 points de calcul ; il est nécessaire de choisir « time step » plus grand que « total time »/6000 (dans le cas contraire, le logiciel ne travaille que jusqu'à 6000×time step)



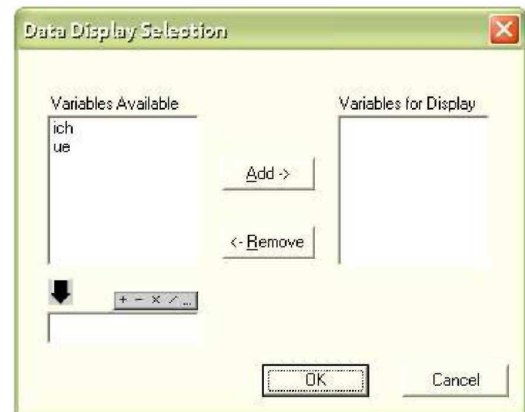
Simulation et exploitation

Lancer la simulation :

Par « **simulate / run simulation** » (ou par appui sur F8)
La fenêtre de visualisation des résultats apparaît, ainsi qu'une boîte permettant de sélectionner la (ou les) courbes à afficher sur le même graphique.

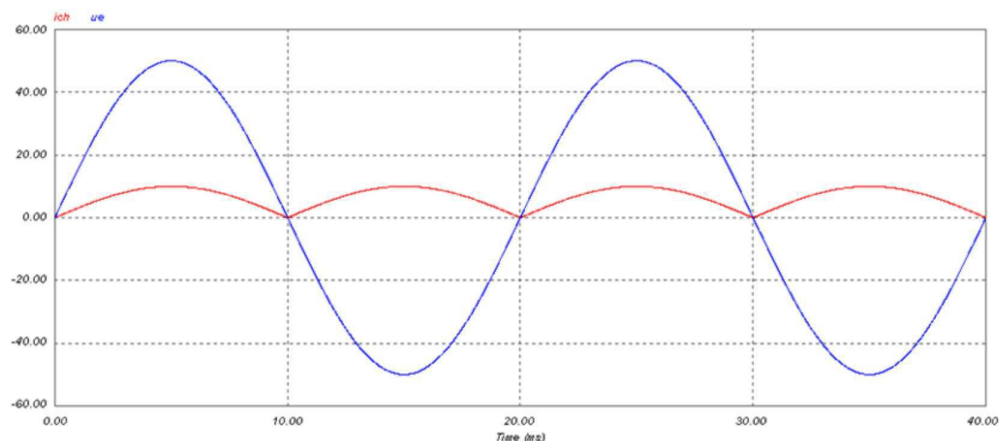
Sélectionner les 2 variables disponibles, puis cliquer sur « **add** », afin de les activer pour l'affichage.

Afin de rendre plus aisée la copie d'écran vers un document imprimable, choisir un fond blanc :
(« **option / set background / white** »)

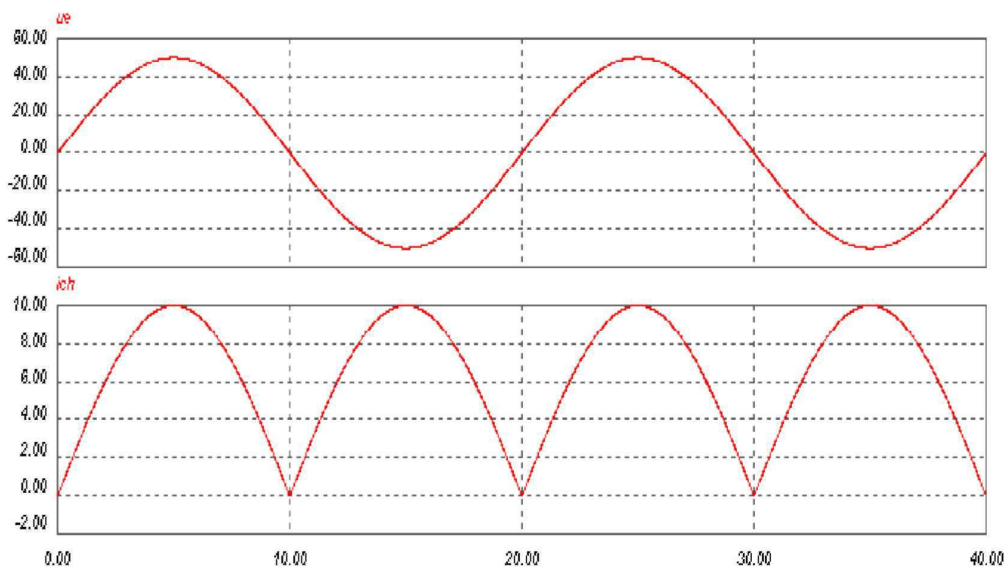


Si les instructions données ont été suivies, vous devriez obtenir l'affichage ci-dessous :

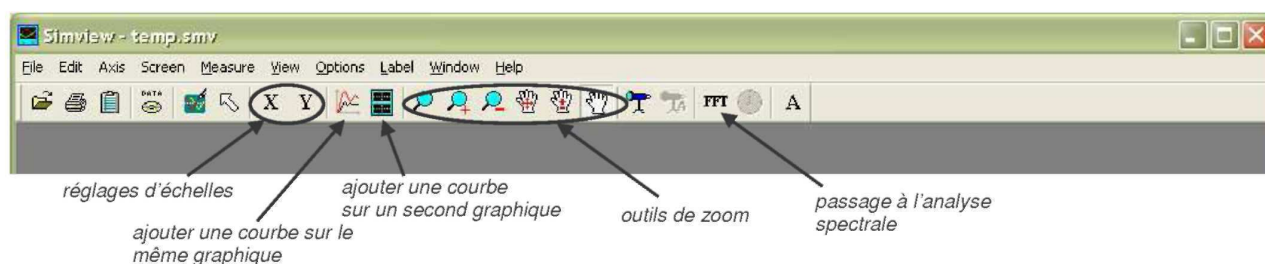
(l'exportation vers votre traitement de texte favori s'effectue par un copier-coller : « **edit / copy to clipboard** » pour copier dans le presse-papiers à partir de Psim)



Il est possible d'obtenir les courbes dans 2 cadres différents : Ne choisir qu'une grandeur à afficher lors de la simulation, puis ajouter un second graphe par « **screen / add screen** ». Le 2^{ème} graphe est placé sous le 1^{er}.



*Remarque : La barre d'outils de l'éditeur graphique « **simview** »*



Mesures sur les courbes :

Choisir « **measure / mesure** » :

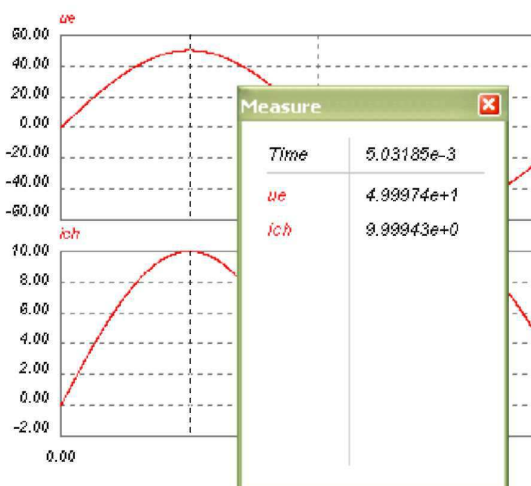
Un curseur apparaît, ainsi qu'une boîte de coordonnées.

Sélectionner la grandeur à évaluer, en cliquant sur son nom en haut du graphique correspondant.

Il est possible d'afficher, dans la boîte de coordonnées :

- La valeur moyenne « **measure / average** »
résultat, pour ich : $\approx 6,37A$
- La valeur efficace « **measure / RMS** »
résultat $\approx 7,07A$ pour ich

(Voir également la barre d'outils en bas à gauche de l'écran)



Informations annexes :

De nombreux exemples et un manuel complet (en anglais !!) figurent dans les répertoires « exemples » et « docs » créés lors de l'installation ; voir également le site de Powersys (<http://www.powersys.fr>)

De façon générale, des info-bulles sont activées lors de l'arrêt du pointeur de souris sur les divers boutons des 2 fenêtres (saisie de schéma et éditeur graphique)

Inversion d'un composant : « **edit / flip L/R** » (symétrie horizontale) ou « **T/B** » (verticale) ou bouton correspondant.

Rotation de 90° : « **edit / rotate** » ou bouton correspondant.

Passages du domaine temporel au domaine fréquentiel : « **option / FFT** » ou boutons correspondants

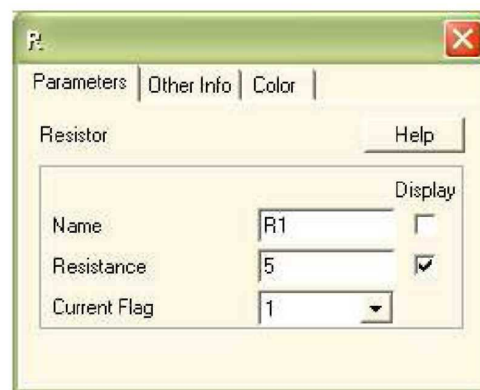
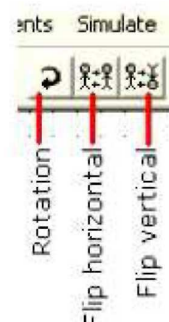
Modification des échelles : « **axis / X axis** » ou « **axis / Y axis** » ou boutons **X** ou **Y**

Aperçu avant impression : « **file / print preview** » ; pour éliminer la grille, changer les couleurs ... « **options / settings** » et renseigner à votre convenance les rubriques de la boîte qui s'ouvre.

Affichage automatique d'un courant dans un composant :

Dans la boîte qui s'ouvre après un double clic, mettre « **current flag** » à 1 ; ici, i(R1) sera disponible pour affichage après la simulation : La sonde de courant placée sur le schéma peut être éliminée !

Actualisation : La fenêtre graphique (SIMVIEW) est automatiquement actualisée lors de toute nouvelle simulation. La laisser ouverte afin d'éviter de choisir à nouveau les grandeurs à afficher.



Activités complémentaires :

(Ces activités peuvent correspondre à une séance de travaux pratiques)

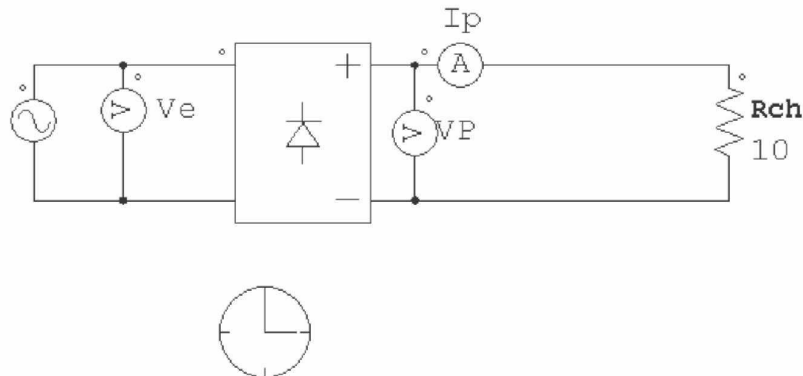
1) Redresseur PD2 sur charge résistive :

Conserver le circuit précédent ; placer des sondes de mesure comme ci-dessous :

Remarquer que les 4 diodes du pont sont remplacées par un « composant », intégré dans PSIM :

« 1ph-diode bridge », situé dans « **element / power / switches** »

Relancer une simulation pour une valeur 10Ω ou 1000Ω de la résistance de charge ;



Observer l'allure des signaux $v_E(t)$, $v_P(t)$ et $i_P(t)$; déterminer le *taux d'ondulation* de $v_P(t)$ et $i_P(t)$.

(On définit le **taux d'ondulation** β d'un signal $x(t)$ par la relation approchée $\beta = \frac{\hat{X} - \tilde{X}}{2\tilde{X}}$)

2) Filtrage par condensateur

Câbler un condensateur de capacité valant successivement 50μF puis 500μF aux bornes de la charge.

Attention, pour le logiciel, micro s'écrit « u » ou « e-6 »

Pour chacune de ces 2 valeurs de capacité, réaliser une simulation pour les 2 valeurs de la charge ; observer les 3 signaux $v_E(t)$, $v_P(t)$ et $i_P(t)$.

Quelle grandeur (v_P ou i_P) est filtrée ici ?

Dans lequel des cas le taux d'ondulation du courant ou de la tension *relatifs à la charge* est-il le plus faible ? Combien vaut-il ? Relever un chronogramme représentatif

3) Filtrage par bobine.

Éliminer le condensateur précédent. Câbler maintenant une inductance pure (bobine parfaite) en série avec la charge R_{CH} ; cette inductance pourra prendre les valeurs 0,1H ou 1H.

Dans chacun des 4 cas possibles, lancer la simulation sur une durée de 0,5s (final time) avec un pas de calcul de 100μs (time step) ; cette durée est nécessaire pour observer le régime permanent du montage.

Observer les 3 signaux $v_E(t)$, $v_P(t)$ et $i_P(t)$.

Quelle grandeur (v_P ou i_P) est filtrée ici ?

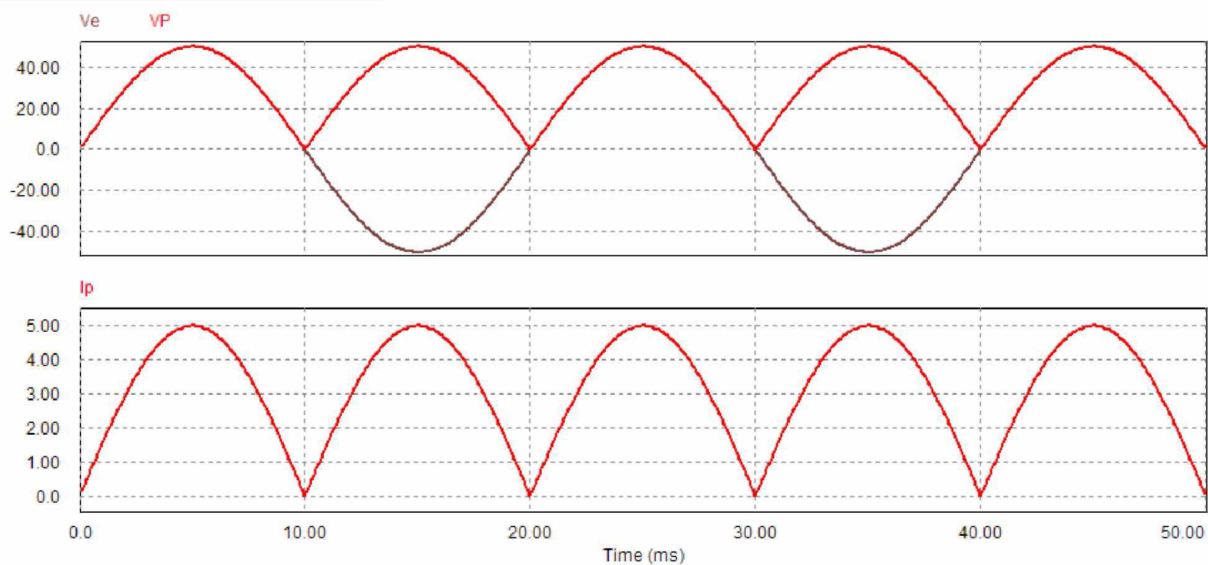
Dans lequel des cas le taux d'ondulation du courant ou de la tension *relatifs à la charge* est-il le plus faible ? Combien vaut-il ? Relever un chronogramme représentatif

4) Synthèse.

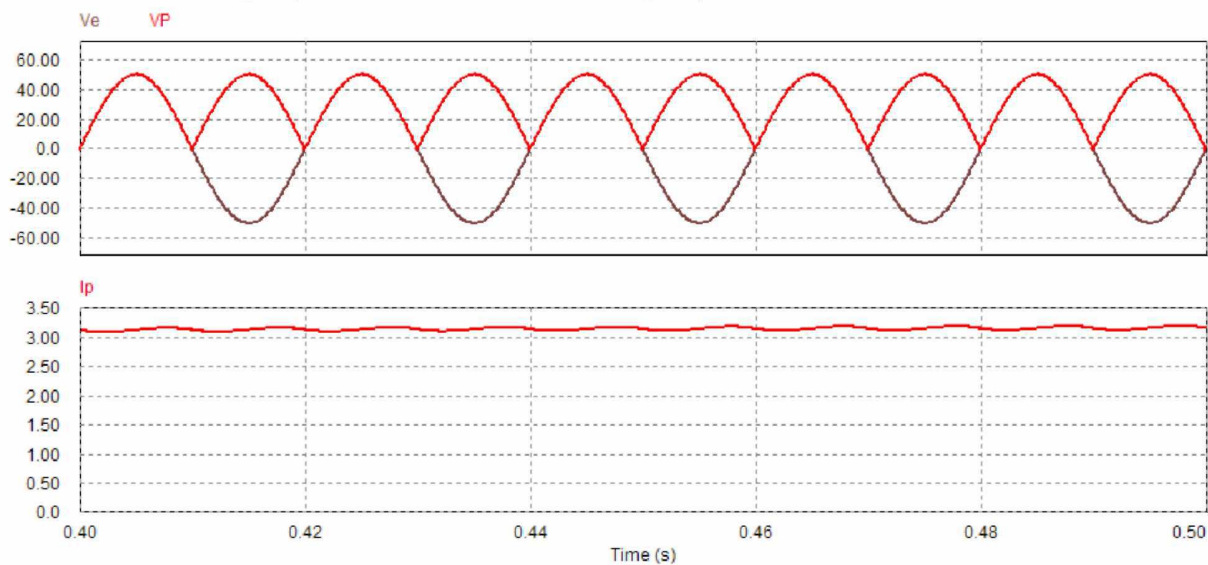
De l'étude menée ici, dégager les conditions d'utilisation du filtrage par condensateur ou par inductance.

Exemple de résultats :

1. Redresseur PD2 sur charge $R = 10\Omega$



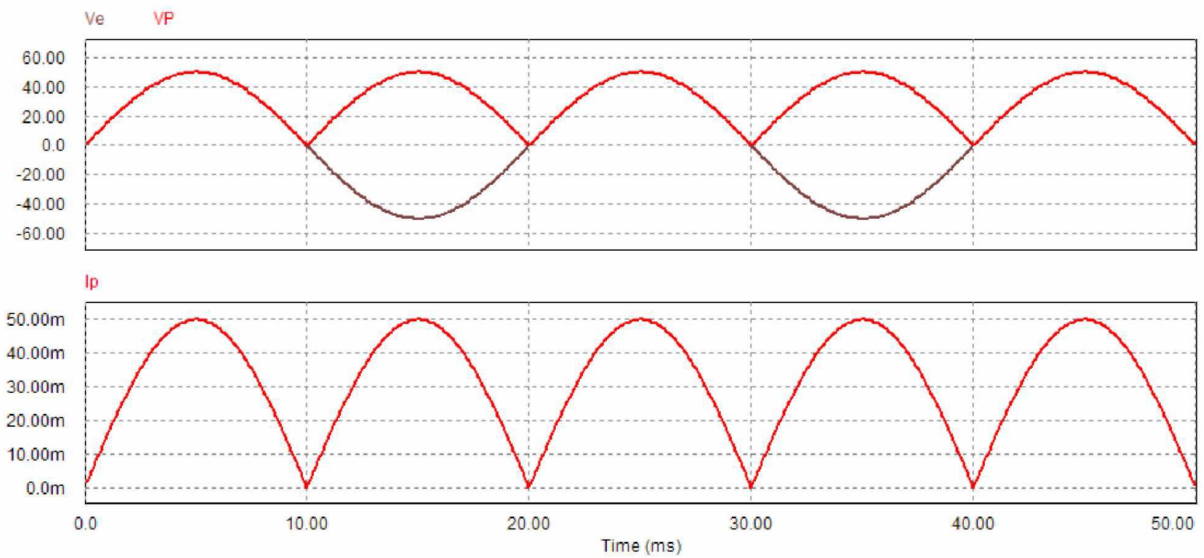
$I_{p\text{moy}} = 3,18\text{A}$; tx d'ondulation $\approx 78\%$ $V_{p\text{moy}} = 31,8\text{V}$; tx d'ondulation $\approx 78\%$
Filtrage par $C = 50\mu\text{F}$: Pas d'effet notable
 $C = 500\mu\text{F}$: $I_{p\text{moy}} = 3,76\text{A}$; tx d'ond $\approx 1,24$ $V_{p\text{moy}} = 35,4\text{V}$; tx d'ond $\approx 45\%$
 $L = 0,1\text{H}$: $I_{p\text{moy}} = 3,18\text{A}$; tx d'ond $\approx 0,1$ $V_{p\text{moy}} = 31,8\text{V}$; tx d'ond $\approx 78\%$
 $L = 1\text{H}$: $I_{p\text{moy}} = 3,16\text{A}$; tx d'ond $\approx 1\%$ $V_{p\text{moy}} = 31,8\text{V}$; tx d'ond $\approx 78\%$ (chron ci dessous)



Conclusion :

Sur charge faible (donc fort débit), le filtrage capacitif nécessite des valeurs de capacité énormes ; le filtrage inductif, plus adapté n'agit que sur le courant de sortie du pont et pas sur la tension .

2. Redresseur PD2 sur charge $R = 1k\Omega$



$I_{p\text{moy}} = 3,18\text{mA}$; tx d'ondulation $\approx 78\%$

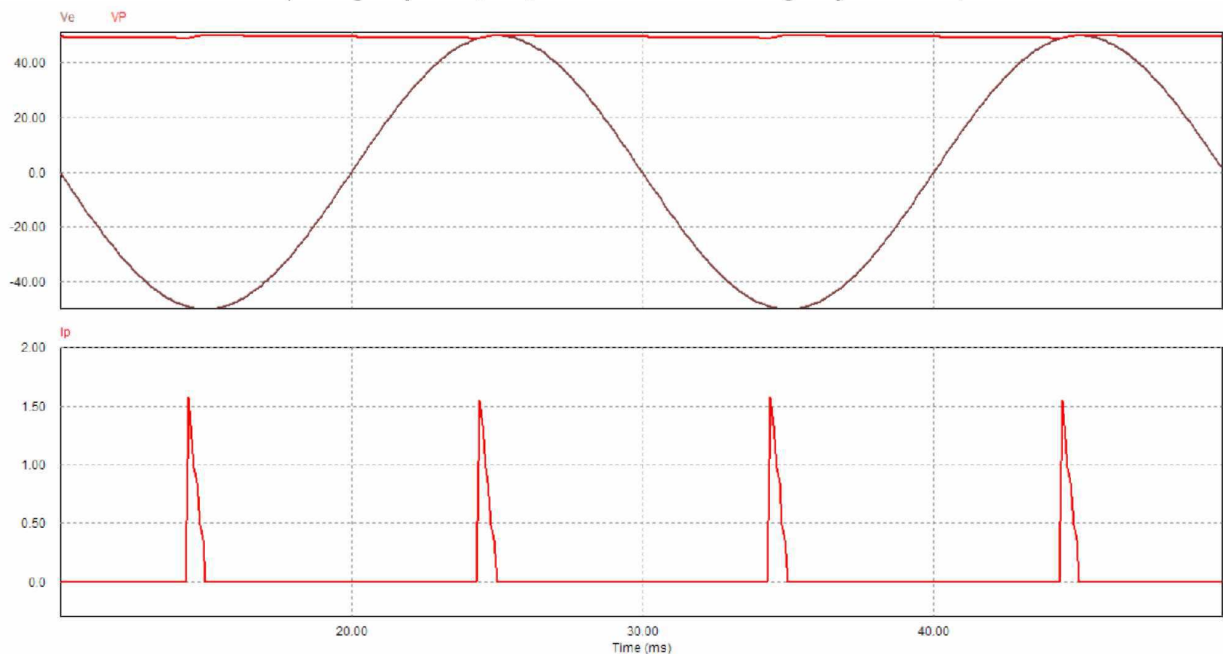
$V_{p\text{moy}} = 31,8\text{V}$; tx d'ondulation $\approx 78\%$

Filtrage par inductance $0,1\text{H}$: Pas d'effet notable.

1H : Aucun effet sur V_p ; $I_{p\text{moy}} = 32\text{mA}$; tx d'ond $\approx 60\%$

Filtrage par condensateur $50\mu\text{F}$: $V_{p\text{moy}} = 46,3\text{V}$; tx d'ond $\approx 7,5\%$; $I_{p\text{moy}} = 45,3\text{mA}$; tx d'ond $\approx 4,85$

$500\mu\text{F}$: $V_{p\text{moy}} = 49,5\text{V}$; tx d'ond $\approx 1\%$; $I_{p\text{moy}} = 55\text{mA}$; tx d'ond $\approx 14\%$!!



Conclusion :

Sur charge élevée (donc faible débit), le filtrage inductif nécessiterait des valeurs d'inductance énormes ; le filtrage capacitif, plus adapté n'agit que sur la tension de sortie du pont ; attention toutefois, le courant de sortie du pont devenant fortement impulsif, il y a lieu de limiter ce type de filtrage afin de ne pas avoir à surdimensionner ni le pont de diodes, ni le transformateur d'alimentation !

➤ Annexe 2 – La norme EN 61000-3-2

Résumé : La présente partie de la CEI 61000 traite de la limitation des courants harmoniques injectés dans le réseau public d'alimentation. Elle définit les limites des harmoniques du courant d'entrée qui peuvent être produits par les matériels soumis à l'essai dans des conditions spécifiées. Les harmoniques sont mesurés conformément aux dispositions des annexes A et B. Cette partie de la CEI 61000 est applicable aux appareils électriques et électroniques ayant un courant d'entrée dont la valeur est inférieure ou égale à 16 A par phase et qui sont destinés à être raccordés à des réseaux publics de distribution à basse tension. Les appareils de soudage à l'arc qui ne sont pas du matériel professionnel, dont le courant d'entrée est inférieur ou égal à 16 A par phase, sont inclus dans le domaine d'application de la présente norme. Les appareils de soudage à l'arc destinés à un usage professionnel, tels que spécifiés dans la CEI 60974-1, sont exclus du domaine d'application de la présente norme et peuvent être sujets à des restrictions d'installation comme indiqué dans la CEI 61000-3-4 ou la CEI 61000-3-12. Les essais effectués conformément à la présente norme sont des essais de type. Les conditions d'essais pour des appareils particuliers sont indiquées à l'annexe C. Pour les systèmes alimentés par des réseaux dont la tension nominale est inférieure à 220 V (phase par rapport au neutre), les limites n'ont pas encore été envisagées.

La norme EN 61000-3-2 détermine, pour un réseau de tension comprise entre 220V et 240V, les valeurs efficaces à ne pas dépasser pour les courants harmoniques jusqu'au rang 40 (Figure 11 et Figure 13). Cette norme est divisée en quatre classes, en fonction du type d'appareils utilisés, des niveaux de puissance et de la forme du courant absorbé.

- 1) La classe A : cette classe concerne les équipements triphasés équilibrés et tout autre appareil à l'exception de ceux qui sont indiqués dans l'une des classes suivantes.
- 2) La classe B : cette classe concerne les outils portatifs. Les valeurs limites sont celles de la classe A multipliées par un facteur 1,5.
- 3) La classe C : cette classe se rapporte aux équipements d'éclairage, y compris les variateurs de lumière. Les courants harmoniques de rang impair sont exprimés en valeur relative par rapport au courant fondamental.
- 4) La classe D : les équipements de puissance inférieure à 600W et possédant un courant qui s'inscrit à l'intérieur du gabarit de la Figure 12 pendant au moins 95% de la demi-période sont concernés par la classe D. La valeur crête du courant doit être centrée dans ce gabarit. Les valeurs limites des harmoniques impairs sont exprimées en valeur relative par rapport à la puissance. Les valeurs absolues doivent néanmoins rester inférieures à celles de la classe A.

Rang harmonique	classe A (A _{eff})	Classe B (A _{eff})	classe C (%)	classe D (mA/W)
<i>impair</i>				
3	2,3	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,15	7	1
9	0,4	0,6	5	0,5
11	0,33	0,5	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,3
15 à 39	0,15.(15/n)	0,225.(15/n)	3	3,85/n
<i>pair</i>				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		
8 à 40	0,23.(8/n)	0,345.(8/n)		

Figure 11 : Amplitude des harmoniques selon la classe

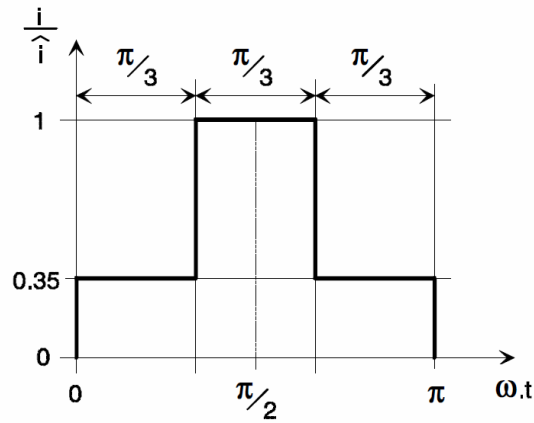


Figure 12 : Gabarit pour la classe D

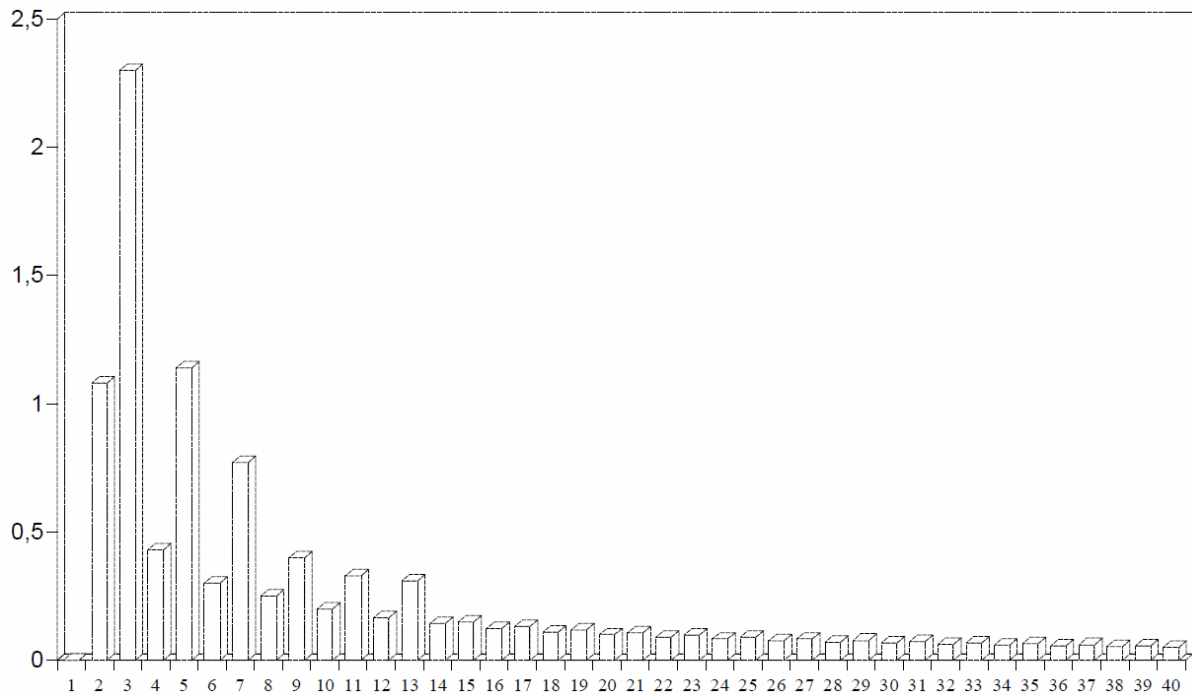


Figure 13 : Limites des composantes harmoniques du courant - CEI 1000-3-2 classe A.

Références bibliographiques

- Norme Française, Norme Européenne, NF EN 61000-3-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) partie 3 : limites - section 2 : limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils inférieur à 16 A par phase)*, Deuxième édition août 2000.

NF EN 61000-3-2 Août 2006

Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-2 : limites - Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils inférieur ou égal à 16 A par phase)

Document modifié par les amendements : NF EN 61000-3-2/A1:Novembre 2009 (C91-003-2/A1), NF EN 61000-3-2/A2:Novembre 2009 (C91-003-2/A2)

Directive(s) européenne(s) Nouvelle Approche : DI 2004/108 01/12/2004 Directive relative au rapprochement des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique et abrogeant la directive 89/336/CEE - (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)

- J.-C. GUIGNARD, *Les harmoniques : application des normes de CEM associées*, REE N° 5, mai 1999, pp 37-43.

- Normes CEI-555, *Perturbations produites dans les réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et les équipements analogues*, publications 555-1, 555-2 et 555-3, première édition 1982.