

MP 21 : Conversion de puissance électrique-électrique

Albane Lambert

Jules Tayol

Bibliographie

- Hprépa, Electronique 2, PSI-PSI*, J.M Brébec [1]
- Duffait d'électronique [2]
- Quaranta tome 4, Électronique [3]

Rapports de jury

[2012] "Suite aux remarques des années précédentes l'utilisation du régime nominal de fonctionnement a été plus répandue cette session. Le transformateur n'est pas le seul dispositif pouvant être présenté dans ce montage."

[2010] "Comme l'an dernier, le jury regrette de ne pas voir plus souvent de réelles mesures de puissance et de rendement, pour des convertisseurs utilisés en régime nominal."

[2008] "Le transformateur est souvent utilisé pour les montages 16, 20, 21, 40. Les candidats ignorent généralement l'origine de la loi sur les courants pour le transformateur idéal ainsi que la notion de courant magnétisant. En outre, la visualisation à l'oscilloscope du cycle d'hystérésis est trop souvent assortie d'erreurs de calibration des axes (H, B), conduisant ainsi à des estimations de pertes par mesure d'aires dénuées de sens."

[2007] "Il s'agit de conversion de puissance, non de conversion de signal."

Table des matières

1	Le transformateur	2
1.1	Présentation qualitative [1],[3]	2
1.2	Caractéristique en charge	3
1.3	Pertes fer	4
1.4	Pertes cuivre	5
2	Redresseur double alternance et lissage de la tension redressée	6
3	Hacheur dévolteur [2],[3]	7

Introduction [1],[3]

L'utilisation de très hautes tensions est nécessaire pour transporter l'énergie avec peu de pertes. Actuellement, le transport d'électricité sur de longues distances se fait sous des tensions de l'ordre de 300kV. Les alternateurs des centrales électriques ne peuvent pas fournir directement de telles tensions : il est donc nécessaire d'élever la tension au niveau de la centrale électrique. C'est le rôle du transformateur, qu'on étudiera dans une première partie. C'est une conversion alternatif-alternatif. Près du lieu de consommation, il faut abaisser cette tension pour qu'elle puissent être utilisée : on a besoin d'un transformateur

abaisseur de tension.

Mais pour alimenter la plus part des appareils électroménagers, on a besoin d'une tension continue : le redresseur double alternance permet d'effectuer la conversion alternatif-continu, ce qu'on verra dans une deuxième partie.

Enfin, dans une dernière partie, on montrera comment contrôler la luminosité d'une lampe, à l'aide d'un hacheur dévolteur qui effectue une conversion continu-continu.

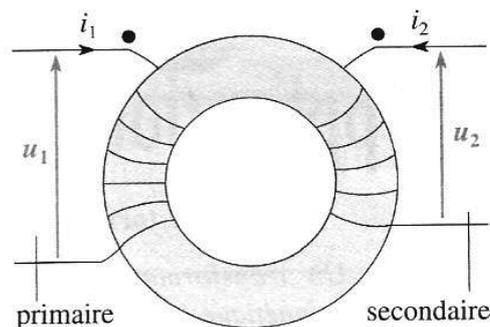
1 Le transformateur

1.1 Présentation qualitative [1],[3]

Le transformateur est un convertisseur d'énergie électrique statique (car elle se produit sans conversion d'énergie électrique). Il transfère, en alternatif, de la puissance électrique d'une source placée dans le circuit primaire, à une charge placée dans le circuit secondaire. Cette conversion s'effectue dans modification de fréquence et avec un excellent rendement dans les transformateurs industriels.

Un transformateur est constitué d'un circuit magnétique fermé, sur lequel sont bobinés deux enroulements électriquement indépendants : le primaire, relié à la source, et le secondaire relié à la charge. Le circuit magnétique canalise les lignes de champs magnétique, qui peut donc être considéré comme quasiment nul en dehors du matériau. Le noyau se comporte donc comme un tube de champ.

Le transformateur parfait est caractérisé uniquement par son rapport de transformation m .



Doc. 12. Convention d'orientation.

Avec les conventions indiquées sur la figure, on a les relations suivantes :

– Loi des tensions du transformateur parfait : (*démo Quaranta tome 4, p 578-579; attention, dépend des conventions de signe*) $\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$

– Loi des courants du transformateur parfait : $\frac{i_2}{i_1} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{m}$

m étant le rapport de transformation. Le transformateur parfait est un modèle linéaire. La puissance instantanée fournie au primaire du transformateur parfait est intégralement transférée à la charge par le secondaire : il n'y a ni stockage ni dissipation d'énergie.

Expérience qualitative : On place deux bobines sur un noyau de fer doux, fermé. On alimente la première bobine à l'aide d'un GBF. On observe les tension aux bornes des

deux bobines, u_1 et u_2 sur l'oscilloscope. Vérifier le rapport de transformation, en jouant sur le nombre de spires ; vérifier que la fréquence est inchangée ; noter qu'on a en fait $\frac{u_2}{u_1} < m$ à cause de pertes (ce n'est pas un transformateur parfait). Conclure sur le rôle d'un transformateur : il permet en effet d'élever et d'abaisser la tension.

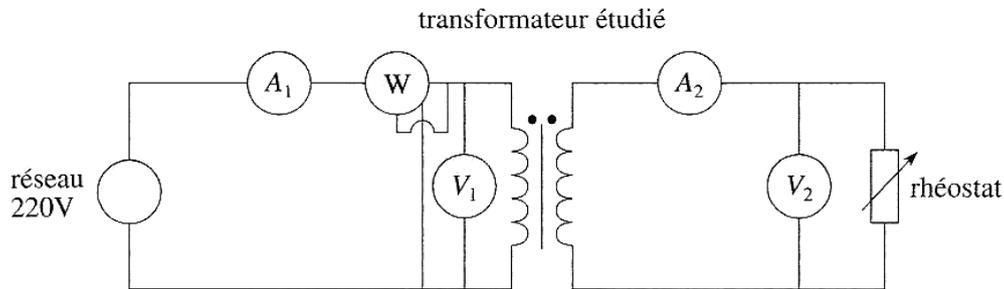
Noter que le transformateur "démontable" réalisé avec les deux bobines ne peut donner de bon rendement : (*Quaranta*) "par suite des pertes de flux magnétique et de la valeur élevée de la réluctance, le transformateur démontable est un "mauvais transformateur" qui ne donne les résultats attendus que pour de faibles valeurs des intensités et en particulier à vide."

1.2 Caractéristique en charge

Un transformateur doit être adapté à la source et à la charge auxquelles il est relié. Pour cette raison, les constructeurs précisent les caractéristiques suivantes : la fréquence d'utilisation, la tension d'alimentation primaire, la tension de sortie à vide et la puissance apparente. On parle de grandeurs nominales, telles que le rendement soit maximal.

On souhaite faire une mesure de rendement, directement car on s'intéresse au régime nominal. But de l'expérience : quelle est l'intensité d'utilisation (intensité dans le secondaire) qui offre le meilleur rendement ?

On réalise le montage suivant :



Doc. 32. Étude en charge.

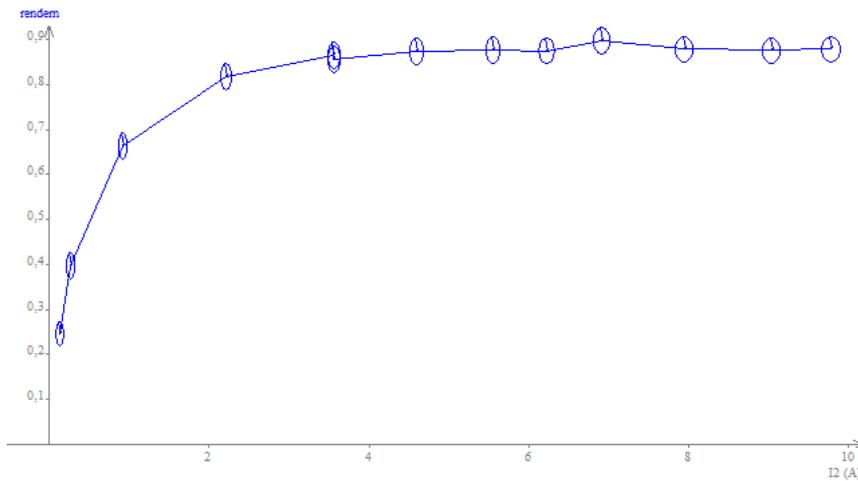
Détails techniques : "réseau 220V" : on utilise le transfo bleu ; le transformateur étudié (*P 42.43/1*) a une tension nominale $u_{1,nominale}$ "primaire" de 230 V, $u_{2,nominale}$ secondaire de 24 V et un courant nominal $i_{2,nominal}$ de 8A. Le transformateur étudié est un transformateur abaisseur de tension : le rapport de transformation "théorique" d'après les données constructeurs se calcule comme suit : $m_{th} = \frac{u_{2,nominale}}{u_{1,nominale}} = \frac{24}{230} = 0.104$; comme ceux placés avant la distribution du courant dans les maisons.

Expérience : On travaille ici à $u_1 = u_{1,nominale} = 230V$ (réseau), la tension du primaire nominale. On mesure P_1 et P_2 au wattmètre, ainsi que u_2 et i_1 . Les incertitudes sont précisées sur la notice du wattmètre. Le rendement est défini par :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

On trace $\eta = f(i_2)$, en faisant varier le rhéostat (que l'on suppose purement résistif). Conclusion : le rendement est maximale pour une certaine gamme de courant (si on monte plus haut, on devrait s'apercevoir que le rendement rediminue, mais on n'a pas pu le faire à cause de la limitation en courant des rhéostats). Le comportement du transformateur en charge est proche de celui du transformateur parfait au voisinage de son utilisation

nominale : $u_{1,nominale} = 230V$ et $i_{2,nominal} = 8A$, que l'on retrouve conformément aux données constructeurs.



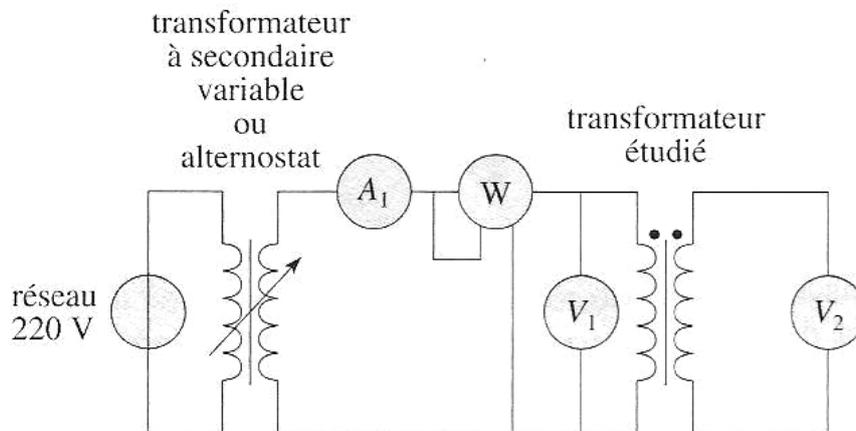
On trouve : $\eta(i_{2,nominal}) = 0.88 \pm 0.03$

Mais on constate qu'il y a des pertes $\eta < 1$: le transformateur réel n'est pas parfait. On va s'intéresser à chaque type de pertes dans les deux sous-parties suivantes. On utilisera ensuite la méthode des pertes séparées qui permet de déduire un rendement plus précisément que la méthode directe que l'on vient de faire.

1.3 Pertes fer

Les pertes fer sont la somme des puissances dissipées dans un transformateur à cause des courants de Foucault et de l'hystérésis de la carcasse magnétique.

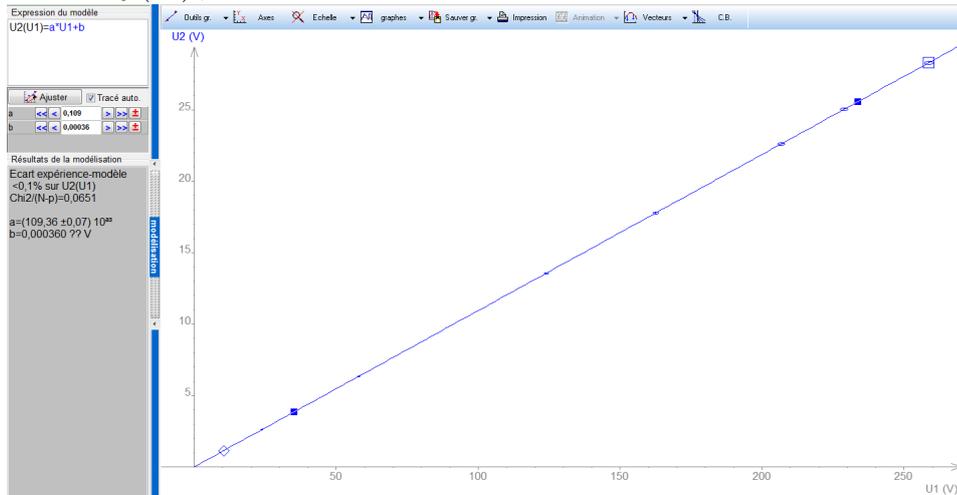
Pour évaluer les pertes fer, on réalise une étude à vide : le courant à vide est faible (*cf Quaranta p579*). Cela permet de négliger pour l'instant les pertes cuivre (on y reviendra après). Les pertes fer sont assimilées à la puissance P_1 consommée par le transformateur à vide. On réalise le montage suivant :



C'est le même montage qu'avant mais on met en valeur que l'on va faire varier le transformateur d'entrée. L'impédance du voltmètre au secondaire doit être suffisamment grande pour que le fonctionnement du transformateur soit très proche de celui à vide.

Expérience :p42 On mesure les valeurs efficaces u_1 , u_2 , i_1 et p_1 en faisant varier le transformateur variable.

- On trace $u_2 = f(u_1)$; On trouve :



On constate que la pente est $0.1094 \pm 0.0001 \simeq m_{th}$

Conclusion : à vide, le transformateur réel est parfait pour les tensions (car on retrouve la loi des tensions du transformateur parfait).

- On trace $i_1 = f(u_1)$: ce n'est pas une droite, le transformateur ne peut pas être assimilé à un dipôle linéaire.
- On trace $P_1 = f(u_1^2)$, on a une droite. Les pertes fer sont donc sensiblement proportionnelles au carré de la valeur efficace de la tension d'alimentation. On en déduit :

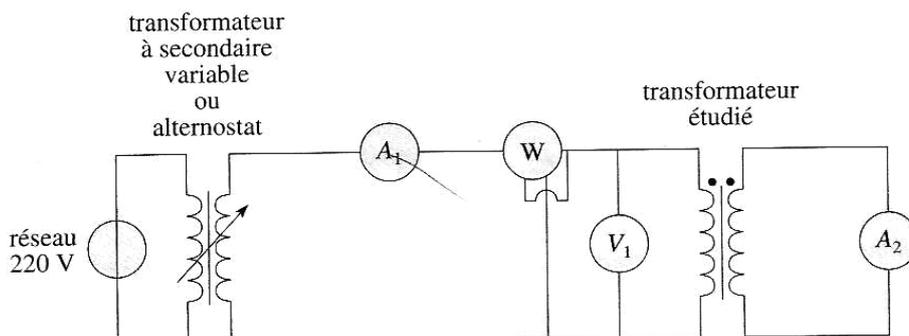
$$\mathcal{P}_{fer} = P_1(u_{1,nominale}) = 9,60 \pm 0.34W$$

Pour que les pertes par hystérésis soient minimales, le cycle d'hystérésis doit être le plus étroit possible : il faut choisir un milieu doux (en effet, la densité volumique d'énergie dissipée par période à cause des pptés magnétiques de la carcasse est égale à l'aire du cycle d'hystérésis, et la puissance volumique moyenne correspondante est donnée par : $\langle p_H \rangle = f \int_{cycle} HdB$ où f est la fréquence). Pour que les pertes par courant de Foucault soient faibles, la carcasse doit être feuilletée (efficace qu'à basse fréquence) ou composée d'un matériau magnétique isolant.

1.4 Pertes cuivre

La puissance dissipée par effet Joule dans les enroulements est appelée perte cuivre. C'est pour cela que réaliser une étude à vide permettrait de rendre négligeable les pertes cuivres.

On réalise maintenant une étude dite en court circuit :



On travaille à $u_1 \simeq 0.1u_{1,nominale}$ pour éviter que l'échauffement à l'intérieur des bobines ne les détruisent. L'impédance de l'ampèremètre doit être suffisamment faible pour

que le fonctionnement du transformateur soit très proche du court circuit : on a alors $u_2 \simeq 0$ et donc $u_1 \simeq 0$, donc les pertes fer sont négligeables (loi des tensions à peu près correcte). Les pertes cuivre sont égale à la puissance dissipée en court circuit, le secondaire étant parcouru par le courant d'utilisation.

Expérience :

- On trace $i_1 = f(i_2)$, on trouve une droite de pente $0.1103 \pm 0.0004 \simeq m$: en court circuit, le transformateur réel est parfait pour les courants.
- On trace $P_1 = f(i_2^2)$, on a une droite. La puissance dissipée par effet Joule dans les enroulements est proportionnelle au carré du courant secondaire. D'où les pertes cuivre :

$$\mathcal{P}_{cuivre} = P_1(i_{2,nominale}) = 10.74 \pm 0.32W$$

On souhaite maintenant réévaluer les pertes avec la méthodes des pertes séparées : la puissance dissipée par un transformateur est proche de la somme de la puissance dissipée, le secondaire étant à vide et le primaire étant alimenté à la tension d'utilisation ; et de la puissance dissipée en court circuit, le secondaire étant parcouru par le courant d'utilisation.

Soit \mathcal{P}_1 la puissance fournie au primaire et \mathcal{P}_2 la puissance disponible au secondaire, on a :

$$P_2 = P_1 - \mathcal{P}_{fer} - \mathcal{P}_{cuivre}$$

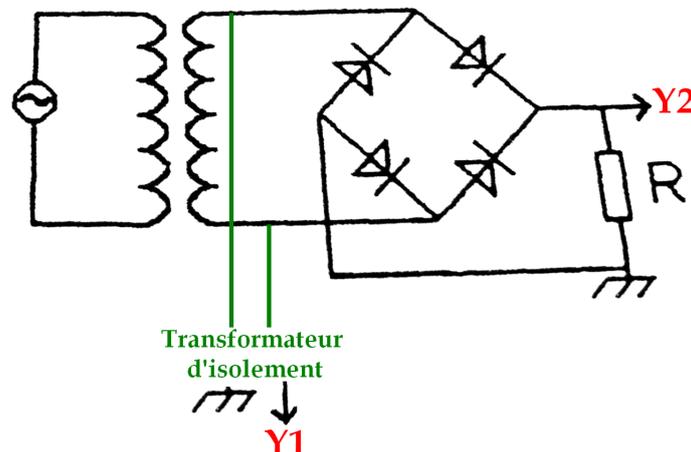
où $P_1 = P_{1,nominal} = P_1(u_{1,nominale}, u_{2,nominale}) = 211,0 \pm 3.3W$. Soit :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \mathcal{P}_{fer} - \mathcal{P}_{cuivre}}{P_1} = 0.903 \pm 0.03$$

On a vu dans cette partie comment augmenter une tension pour la transporter en diminuant les pertes, et comment l'abaisser pour qu'elle soit utilisable par les consommateurs. Mais pour alimenter la plupart des appareils électroménagers, il faut une tension continue. Il est donc nécessaire de convertir de l'alternatif en continu : c'est le rôle du redresseur double alternance.

2 Redresseur double alternance et lissage de la tension redressée

On utilise pour cela un pont de diode, également appelé pont de Graetz. On réalise le montage présenté ci dessous :



Il faut prendre les diodes de redressement qui supportent bien les hautes tensions (boitier tout fait) ; il faut placer un transfo d'isolement (également appelé transfo de séparation, on a donc $m=1$ ce qui ne change rien) pour mesurer la tension non redressée, sinon on a un conflit de masse avec l'oscilloscope.

Expérience :

- On observe les tensions Y_1 et Y_2 sur l'oscilloscope :
les diodes permettent bien un redressement : *le redressement fournit à partir de la tension alternative une tension de signe constant égal autant que possible à la valeur absolue de la tension alternative.* La tension est désormais positive, mais toujours variable dans le temps. La tension redressée est composée d'une tension continue (moyenne) et de composantes alternatives dont le fondamental est le double de la fréquence de l'alternatif de départ.
- Pour réaliser une tension continue, il faut ensuite effectuer un filtrage passe bas avec un condensateur, pour lisser la courbe. On ajoute donc un condensateur au montage, en parallèle de la résistance. *(Un condensateur chimique de capacité $C = 100\mu F$, que l'on peut utilisé car la tension est toujours positive. Attention, ne jamais utilisé un tel condensateur pour des tensions alternatives!)*
- Pour caractériser la qualité de la tension de sortie continue désirée, on définit son taux d'ondulation comme le rapport :

$$\tau = \frac{V_{eff}}{V_{moy}}$$

On mesure ces valeurs expérimentalement avec un multimètre, en position AC pour V_{eff} et en position DC pour V_{moy} . Plus le taux d'ondulation est faible, plus la tension est continue. On trace $\tau = f(\frac{1}{R})$, en faisant varier le rhéostat, en mesurant à chaque fois la résistance à l'ohmmètre. On trouve une droite. Cela permet de vérifier la loi théorique.

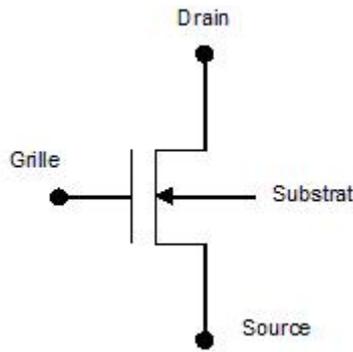
- On voudrait désormais s'assurer que cette nouvelle étape n'a pas fait diminuer le rendement. On l'évalue donc : on mesure P_1 avant le pont de diode, et P_2 après le pont de diode ; avec un wattmètre. On trouve le rendement $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 0.79$. Le rendement est bon.

On a désormais une tension continue. On voudrait désormais contrôler la puissance pour faire varier la luminosité de la lampe.

3 Hacheur dévolteur [2],[3]

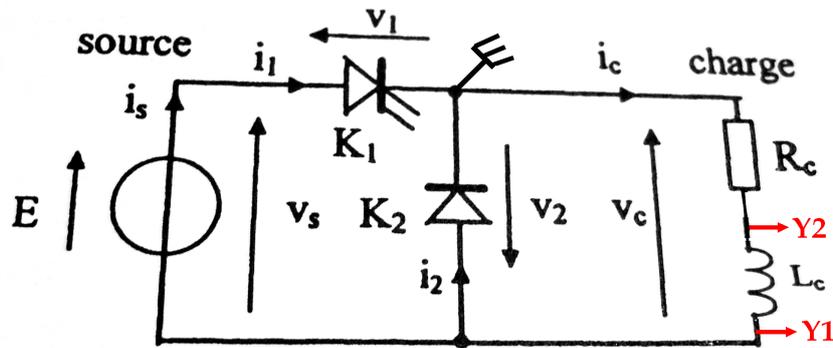
Les hacheurs sont des convertisseurs de puissance continu-continu. Nous allons étudier le hacheur dévolteur dit "abaisseur de tension". Ce dispositif permet de transférer de l'énergie de la source à la charge, grâce à deux commutateurs. Lorsque l'un sera ouvert, l'autre sera fermé, donc en moyenne, la tension est bien abaissée.

L'interrupteur K1 est un transistor MOSFET (BUK455, canal N, *Jack nous a imprimé la "notice constructeur", qui se trouvera désormais classée avec les autres*) : c'est un interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture et à l'ouverture (à l'aide d'un GBF) (transistor à effet de champ). Voici le schéma :



La commutation bloqué/passant nécessite un circuit de commande permettant de charger et décharger rapidement cette capacité, qui a une puissance élevée. K_2 est une diode classique (on peut prendre une diode de redressement, ou une plus rapide (*mais la seule qu'il y a ne marche pas*)), dite diode de roue libre : elle sera bloquante quand K_2 est passant, et passante quand K_2 est bloquant, pour fermer le circuit.

On réalise le montage suivant :

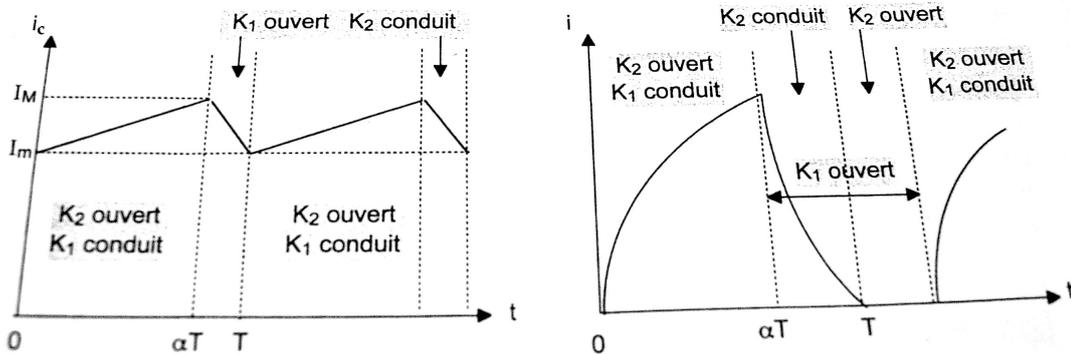


Pour la source de tension E , bien penser à prendre une alim. différentielle (masse flottante). On se place bien sûr à $E = 24V$. On envoie via le GBF une tension créneau, appelée tension de grille, de fréquence f dans le transistor MOSFET (V_{GS}) (qui joue le rôle de l'interrupteur K_1). On peut régler le créneau sur le GBF, on note f la fréquence du créneau, α le rapport cyclique du créneau (tel que l'on observe en Y_1 sur l'oscilloscope : $Y_1(V) = 0$ pour $0 < t < t_0$ et $t_0 + \alpha T < t < t_0 + T$.)

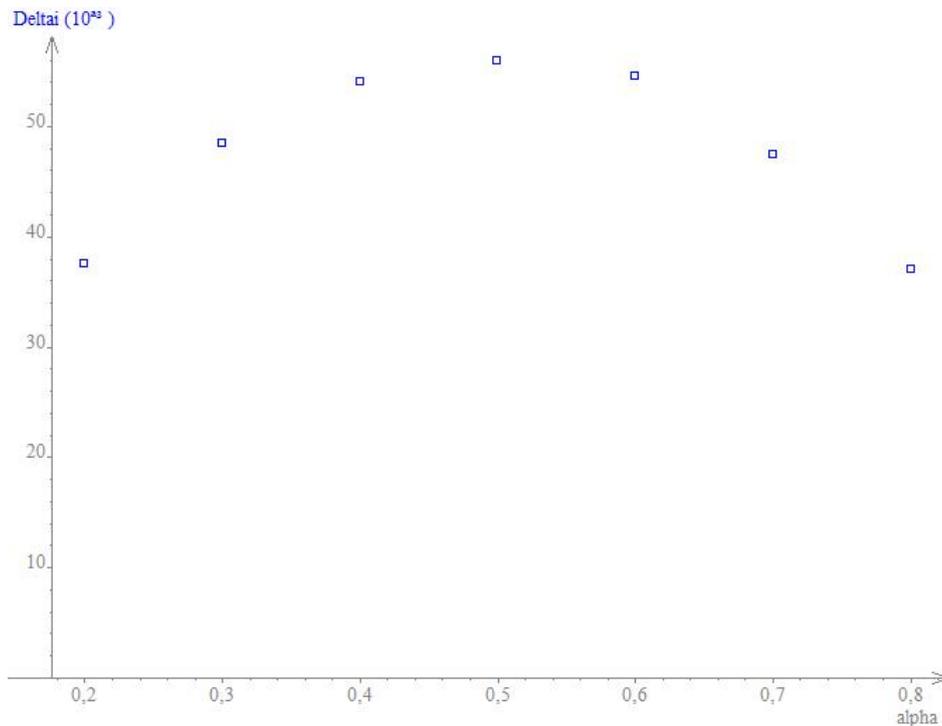
En tant que charge, on choisit placer en série une résistance R et une bobine d'inductance L , qui modélisent l'induit d'un moteur électrique à courant continu. En observant Y_2 , on a une image du courant i_c .

Expérience :

- Montrer qu'il faut que $T = \frac{1}{f} \ll \tau = \frac{L_c}{R_c}$ pour avoir un régime de commutation ininterrompu dans la charge, comme ici à gauche :



- En observant la tension Y_2 , aux bornes de la résistance R , on a accès au courant i_c qui circule dans la charge. On peut résoudre les équations différentielles satisfaites par $i_c(t)$ dans les différents intervalles de temps (cf Duffait tout y est détaillé), et on trouve que i_c varie entre un maximum i_{max} et un minimum i_{min} . Par le calcul, on déduit : $\Delta i_c = i_{max} - i_{min} = \frac{\alpha(1-\alpha)E}{fL}$. On peut vérifier cette formule en traçant : $\Delta i_c = f(\alpha(1-\alpha))$ à T fixé. On peut constater que l'ondulation, Δi_c , est maximale pour $\alpha = 0.5$ et minimale pour $\alpha = 0$ et $\alpha = 1$, comme on pouvait s'y attendre.
- On peut ensuite remplacer la résistance par une lampe, et faire varier son intensité avec α .



Conclusion

On donc vu dans ce montage plusieurs façons de convertir la puissance électrique-électrique : un transformateur permet une conversion alternatif-alternatif, pour par exemple transporter une haute tension pour diminuer les pertes ; un redresseur double alternance qui effectue une conversion alternatif continu ; et enfin le hacheur dévolteur qui permet d'abaisser une tension continu.

Pour conclure, on place les éléments bout à bout, on place une lampe en sortie, et on montre que l'on peut contrôler la luminosité de la lampe.