

## TD12 : conversion électronique

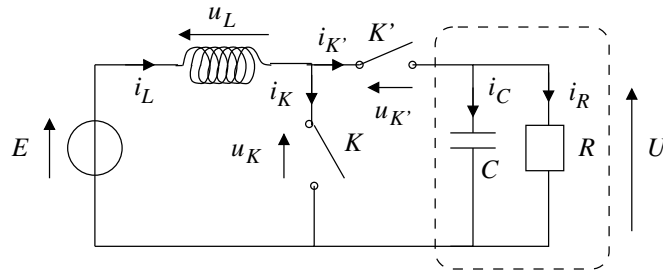
### Hacheur : conversion DC/DC

#### CP024. Alimentation à découpage (\*\*)

La structure ci-dessous est celle d'une alimentation à découpage, alimentée par une source de tension continue de f.é.m.  $E = 50 \text{ V}$ .

On s'intéresse au fonctionnement périodique de période  $T = 50 \mu\text{s}$ . La séquence de commande des interrupteurs est la suivante :

→ pour  $t \in [0, \alpha T[$ ,  $K$  est fermé et  $K'$  ouvert ; pour  $t \in [\alpha T, T[$ ,  $K$  est ouvert et  $K'$  est fermé.



On suppose dans un premier temps que l'association  $R//C$  entourée en pointillés se comporte comme une source de tension idéale  $U = E'$  et on se place dans l'hypothèse où le courant dans la bobine d'inductance  $L$  ne s'annule jamais. On note  $I_m$  et  $I_M$  les valeurs minimale et maximale de  $i_L$ .

1. Expression de  $E'$  :

(a) Donner l'expression de  $u_L$  lors de chaque phase.

(b) Calculer  $\langle u_L \rangle$  de deux manières différentes et montrer que :

$$U = E' = E/(1 - \alpha)$$

2. On règle  $\alpha$  à la valeur  $\alpha = 0,6$ . On accepte une ondulation  $\Delta i = I_M - I_m$  maximale  $\Delta i = 0,3 \text{ A}$  pour cette valeur de  $\alpha$ .

Déterminer la valeur minimale  $L_{min}$  de l'inductance  $L$ .

3. La puissance moyenne fournie par la source de tension  $E$  est  $P = 150 \text{ W}$  pour  $\alpha = 0,6$ . Pour  $L = L_{min}$ , déterminer  $I_m$  et  $I_M$ .

4. Tracer les portions de caractéristiques courant-tension pour chaque interrupteur sur une période  $T$ .

En déduire le fonctionnement, transistor ou diode, des interrupteurs.

5. Quelle est la valeur moyenne  $U_0$  de la tension  $u_K$  aux bornes de l'interrupteur  $K$  ?

6. On se place à nouveau dans les conditions  $\alpha = 0,6$  et  $P = 150 \text{ W}$ .

La tension  $U$  aux bornes de l'association parallèle  $RC$  n'est pas constante, c'est une fonction périodique du temps qui présente une légère ondulation autour de sa valeur moyenne  $E'$ . On suppose que cela ne modifie pas les courants  $i_L$ ,  $i_K$  et  $i_K'$ .

Déterminer littéralement les intensités moyennes  $I_R$  et  $I_C$  des courants dans la charge  $R$  et le condensateur  $C$  en fonction de  $\alpha$ ,  $R$  et  $E$ .

Déterminer numériquement les valeurs moyennes  $P_R$  et  $P_C$  des puissances dissipées dans  $R$  et  $C$ .

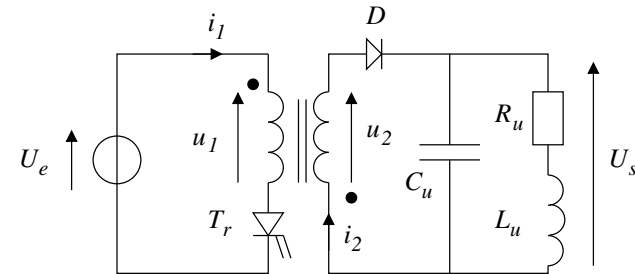
**Réponses :** 1(a) :  $\forall t \in [0, \alpha T[$ ,  $u_L = E$ ;  $\forall t \in [\alpha T, T[$ ,  $u_L = E - E'$ ; 2 :  $L_{min} = 5,0 \text{ mH}$ ; 3 :  $I_M = 3,15 \text{ A}$ ,  $I_m = 2,85 \text{ A}$ ; 4 :  $K$  est un transistor,  $K'$  une diode; 5 :  $U_0 = (1 - \alpha)E' = E$ ; 6 :  $I_C = 0$ ,  $I_R = \frac{E}{(1 - \alpha)R}$ ,  $P_C = 0$ ,  $P_R = P = 150 \text{ W}$

#### CP071. Alimentation à découpage de type Fly back (\*\*\*)

La figure suivante représente une alimentation à découpage transférant de la puissance d'une source de tension, vers une charge passive à tension faiblement ondulante.

La source peut être une tension du réseau ERDF, redressée puis filtrée; elle est modélisée par un générateur de tension continue de fem  $U_e$ .

Pour la charge, on peut envisager une charge inductive ( $L_u, R_u$ ) mise en parallèle avec un condensateur stabilisant la tension  $U_s$  qui sera considérée constante et positive pour la suite.

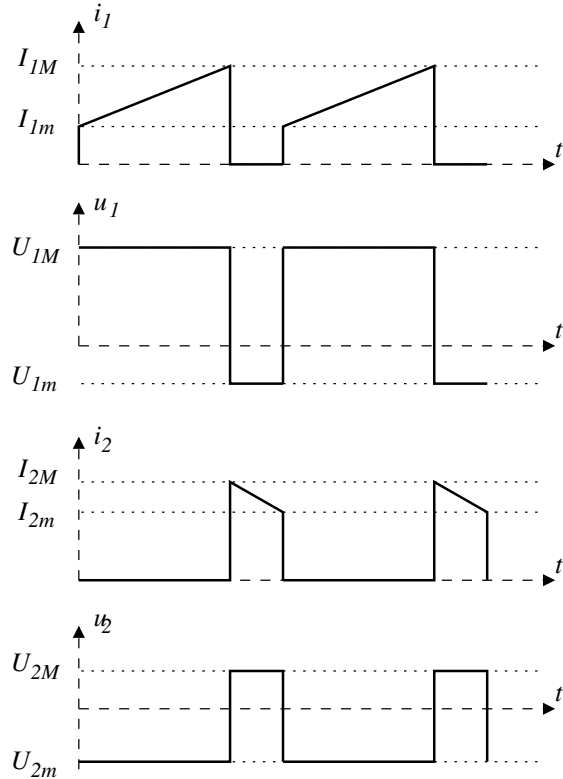


Le transformateur est parfait. On note  $N_1$  et  $N_2$  ses nombres de spires au primaire et au secondaire ( $m = N_2/N_1$ ),  $L_1$  et  $L_2$  ses auto-inductances au primaire et au secondaire. On suppose enfin que le transformateur ne se démagnétise jamais complètement (l'énergie stockée dans un noyau ne s'annule pas).

La commande du transistor  $T_r$  est périodique de rapport cyclique  $\alpha \in ]0, 1[$  :

$$0 < t < \alpha T : T_r \text{ fermé ; } \alpha T < t < T : T_r \text{ ouvert}$$

On donne enfin la forme des tensions et courants dans l'alimentation Fly back.



1. Intervalle  $t \in ]0, \alpha T[$  :

(a) Exprimer  $u_1$  et  $u_2$  sur cet intervalle (attention à la position des bornes homologues). En déduire que la diode est bloquante et expliquer la forme des chronogrammes.

(b) Déterminer une relation liant  $I_{1M}$ ,  $I_{1m}$ ,  $\alpha$ ,  $L_1$ ,  $T$  et  $U_e$ .

2. Intervalle  $t \in ]\alpha T, T[$  :

(a) Quelle est la grandeur continue à l'ouverture du transistor ? En déduire que la diode devient passante, relier  $I_{1M}$  et  $I_{2M}$  et justifier la forme des chronogrammes sur cet intervalle.

3. Montrer finalement que  $U_s = \frac{N_2}{N_1} \frac{\alpha U_e}{1 - \alpha}$ .

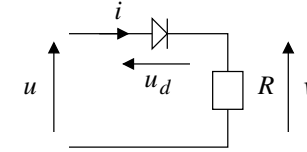
**Réponses :** 1(a) :  $u_1 = U_{1M} = U_e$  ;  $u_2 = U_{2m} = -mU_e$  ; 1(b) :  $\frac{I_{1M} - I_{1m}}{\alpha T} = \frac{U_e}{L_1}$  ;

2(a) :  $I_{2M} = \frac{I_{1M}}{m}$

## Redresseur: conversion AC/DC

### CP046. Redresseur mono-alternance (\*)

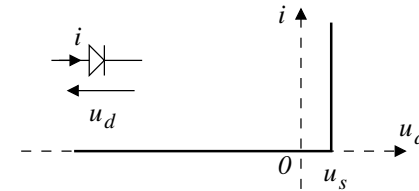
La tension  $u$  est sinusoïdale alternative d'amplitude  $U_0$ .  $D$  est une diode supposée parfaite (tension de seuil nulle). La charge est une résistance  $R$ .



1. Représenter  $u$  et  $v$  sur une période.

2. Exprimer la valeur moyenne de  $v$  et la valeur efficace de  $v$  en fonction de  $U_0$ .

3. On tient maintenant compte de la tension de seuil non nulle de la diode (avec  $u_s \approx 0,5 \text{ V}$ ) :

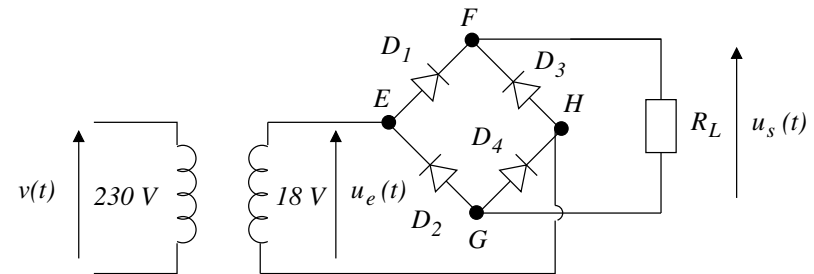


Tracer les nouvelles courbes avec  $U_0 = 6,0 \text{ V}$ .

**Réponses :** 2 :  $\langle v \rangle = \frac{U_0}{\pi}$ ,  $V_{eff} = \frac{U_0}{2}$

### CP084. Redresseur shunt (\*\*\*)

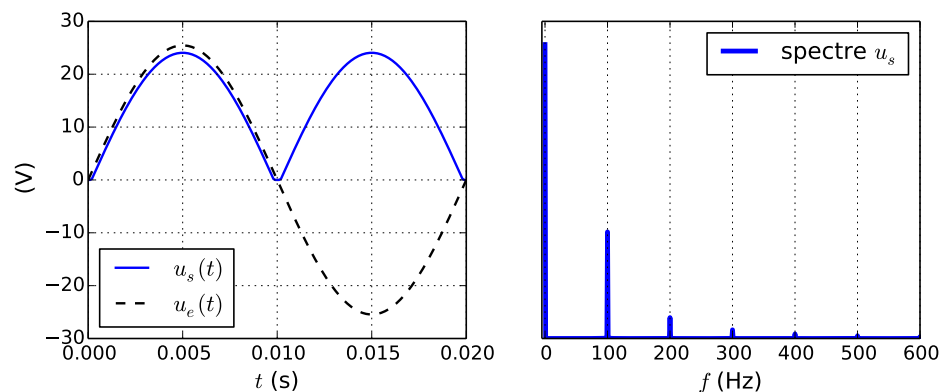
Partant de la tension sinusoïdale issue du réseau, on cherche à obtenir une tension continue présentant une ondulation la plus faible possible, par exemple pour un chargeur de batteries.



On considère pour l'instant le redresseur double alternance représenté sur la figure précédente, constitué d'un transformateur supposé parfait et d'un pont de Graetz,

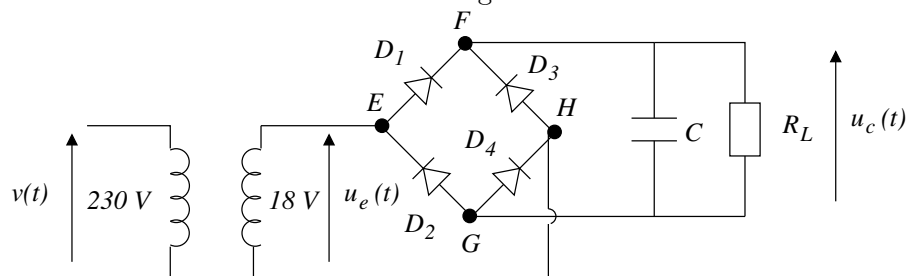
la charge étant modélisée par une résistance  $R_L = 1,0 \text{ k}\Omega$ . La tension du réseau est une tension sinusoïdale de valeur efficace 230 V et de fréquence  $f = 1/T = 50 \text{ Hz}$ .

- Déterminer le rapport  $m$  du transformateur.
- En supposant les diodes idéales, tracer la forme de la tension  $u_s$  sur deux périodes du signal d'entrée. Déterminer la valeur efficace et la valeur moyenne du signal de sortie. On note  $U_e$  l'amplitude de  $u_e$ .
- La simulation suivante représente le signal de sortie et son spectre en fréquence.

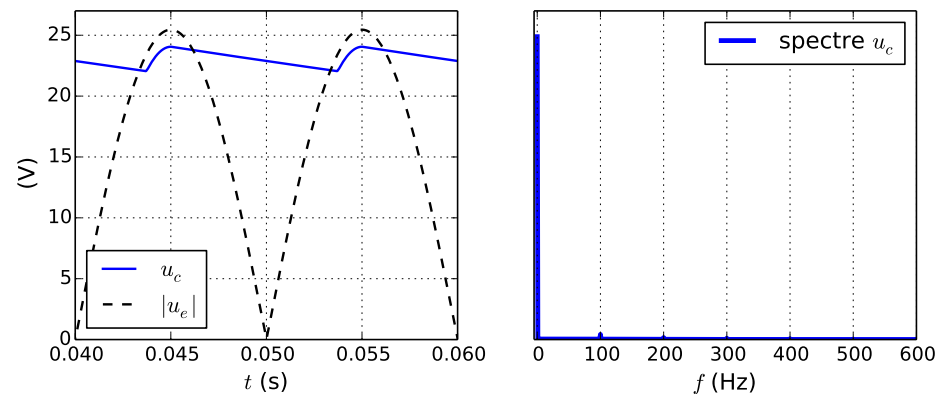


Évaluer la tension de seuil  $V_d$  des diodes.

Afin de filtrer le signal et ne conserver que sa composante continue, on ajoute un condensateur en sortie du montage.



- En utilisant un condensateur de capacité  $C = 100 \mu\text{F}$ , on obtient la courbe suivante pour la tension de sortie en fonction du temps. Justifier la forme de la courbe.

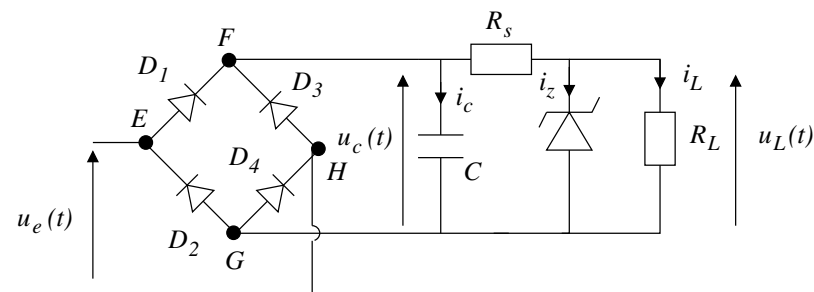


- On note  $\tau$  la constante de temps associée à la décharge du condensateur et  $T$  la période du signal sinusoïdal issu du réseau. En supposant que la décharge a lieu pendant la quasi-totalité de la demi-période et que  $\tau \gg T/2$ , montrer que l'ondulation relative de tension vaut :

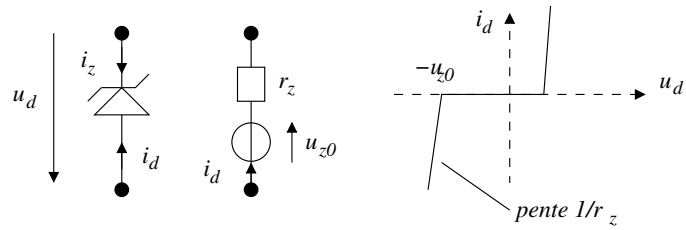
$$\frac{|\Delta u_c|}{u_c^{max}} \approx \frac{T}{2R_L C}$$

Application numérique.

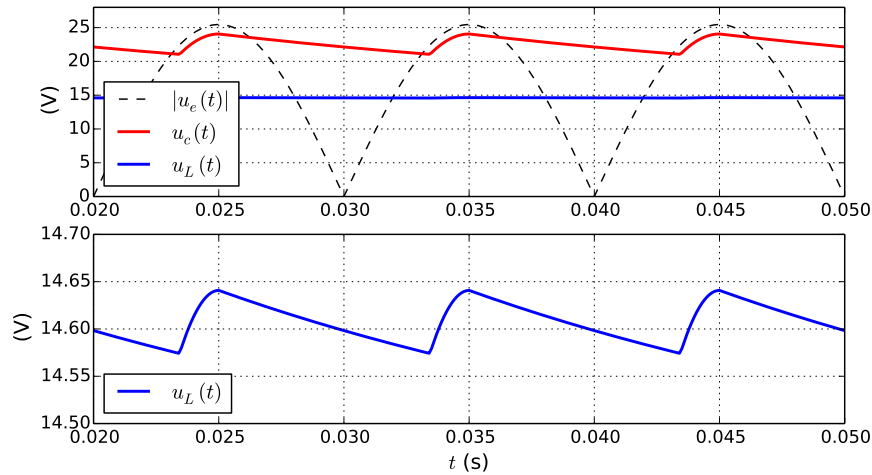
Afin de réduire l'ondulation, on complète le dispositif à l'aide d'une diode Zener selon le montage suivant avec  $R_s = 220 \Omega$ .



La caractéristique de la diode Zener est fournie (Cf. figure ci-après), et on suppose pour la suite que  $u_d \leq -u_{z0}$ . La diode est alors équivalente à un générateur de tension de fem  $-u_{z0} = -14,8 \text{ V}$  et de résistance interne  $r_z = 5,0 \Omega$ , en conséquence  $u_d = -u_{z0} + r_z i_d$ .



Une simulation numérique des différents signaux est reproduite ci-après.



6. On s'intéresse à la décharge du condensateur entre  $t \approx 0$  et  $t \approx T/2$  avec  $u_c(0) = (U_e - 2V_d)$  et  $V_d$  la tension de seuil des diodes du pont de Graetz. Comme  $r_z \ll R_L$ , on supposera que tout le courant qui s'écoule dans  $R_s$  s'écoule dans  $r_z$ . Montrer que :

$$\forall t \in [0, T/2[ \quad u_c(t) = (U_e - 2V_d - u_{z0})e^{-t/\tau'} + u_{z0} \quad \text{avec} \quad \tau' = (R_s + r_z)C$$

7. Estimer l'ondulation de la tension du condensateur  $\Delta u_c = u_c(0) - u_c(T/2)$ .

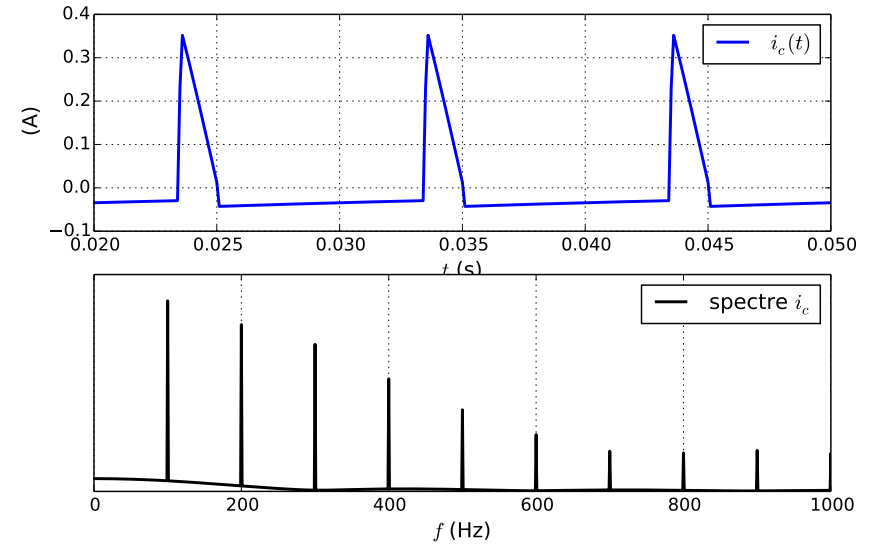
8. Sur ce même intervalle de temps, montrer que :

$$\forall t \in [0, T/2[, \quad u_L(t) = u_{z0} \times \frac{R_s}{R_s + r_z} + \frac{r_z}{R_s + r_z} u_c(t)$$

9. En déduire l'ondulation de la tension au niveau de la charge. Application numérique. On donne  $V_d = 0,70$  V.

Commentaire. Comparer à la valeur donnée par la simulation.

La dernière courbe représente le courant  $i_c$  au cours du temps et son spectre en fréquence.



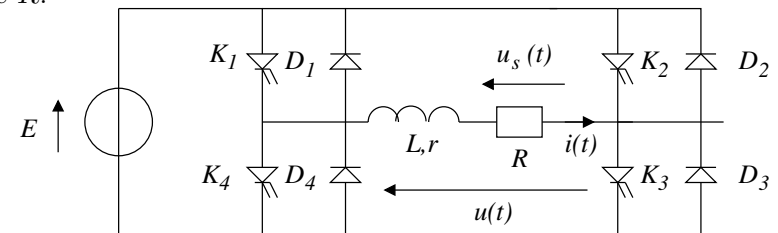
10. Justifier l'allure de la courbe temporelle en cohérence avec les phases de fonctionnement précédemment observées.
11. Estimer le rendement du convertisseur complet. On pourra, en justifiant, comparer la puissance moyenne reçue par le condensateur à la puissance dissipée au sein de la charge et s'aider de lectures graphiques si nécessaire.
12. À l'aide d'une des courbes, justifier l'idée que ce type de redresseur « pollue le réseau électrique ».

**Réponses :** 1 :  $m \approx 0,078$  ; 2 :  $U_{s,eff} = U_e/\sqrt{2}$ ,  $\langle u_s \rangle = 2U_e/\pi$  ; 3 :  $V_d \approx 0,7$  V ; 7 :  $\Delta u_c = (U_e - 2V_d - u_{z0}) \times (1 - e^{-T/(2\tau')})$  ; 9 :  $\Delta u_L = 7 \times 10^{-2}$  V.

### Onduleur: conversion DC/AC

#### CP083. Commandes d'un onduleur en pont (\*\*\*)

L'onduleur de la figure est alimenté par une source de tension de fem  $E$  et a pour charge l'association série d'une bobine, inductance  $L$  et résistance  $r$  et d'une résistance  $R$ .



L'objectif est d'obtenir un courant le plus sinusoïdal possible aux bornes de la charge.

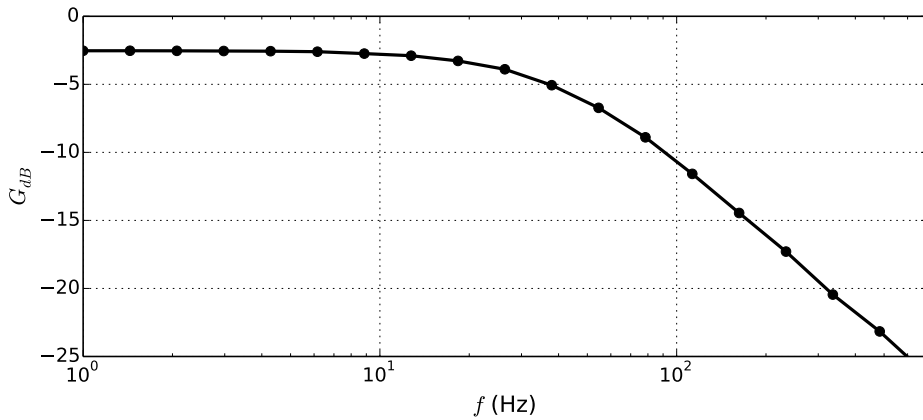
1. La rhéostat a une résistance  $R = 33 \Omega$  et la bobine est un solénoïde à noyau de fer doux.

(a) Montrer que la fonction de transfert  $\underline{H}(j\omega) = \frac{u_s}{u}$  peut se mettre sous la forme :

$$\underline{H}(j\omega) = H_0 \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

avec  $\omega_c$  et  $H_0$  à exprimer en fonction de  $L$ ,  $R$  et  $r$ .

(b) La figure ci-dessous donne le tracé expérimental du diagramme de Bode en amplitude. En déduire les valeurs de  $L$  et  $r$ .



2. **Commande symétrique** : les diodes  $D_1$  à  $D_4$  et les transistors de  $K_1$  à  $K_4$  sont supposés parfaits. Ces derniers sont à commande périodique de période  $T_d$ , de fréquence  $f_d = 1/T_d = 30$  Hz :

$0 < t < T_d/2$	$K_1$ et $K_3$ fermés	$K_2$ et $K_4$ ouverts
$T_d/2 < t < T_d$	$K_1$ et $K_3$ ouverts	$K_2$ et $K_4$ fermés

(a) Donner les caractéristiques de la tension  $u$ .

On rappelle que le développement en série de Fourier d'une tension carrée de valeurs extrêmes  $\pm E$  et de fréquence  $f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{1}{T_d}$  peut s'écrire sous la forme :

$$u(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_{2n+1} \sin [(2n+1)\omega_d t] = \frac{4E}{\pi} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\sin [(2n+1)\omega_d t]}{2n+1}$$

(b) Évaluer les rapports  $b_3/b_1$  et  $b_5/b_1$ .

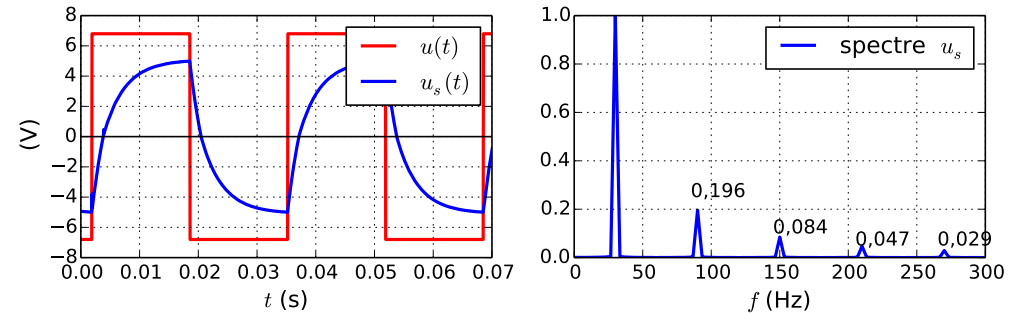
(c) Montrer que la fonction  $u_s(t)$  peut s'écrire sous la forme :

$$u_s(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} B_{2n+1} \sin [(2n+1)\omega_d t + \varphi_{2n+1}]$$

Donner l'expression générale de  $B_{2n+1}$ , en fonction de  $n$ ,  $b_{2n+1}$ ,  $\omega_d$ ,  $\omega_c$ , et  $H_0$ .

(d) Évaluer numériquement les rapports  $B_3/B_1$  et  $B_5/B_1$  et commenter l'efficacité du filtrage.

(e) L'expérience donne les résultats suivants :



i. À la vue de la courbe donnant  $u_s(t)$ , justifier la nécessité de disposer de diodes en parallèle des transistors. On pourra raisonner dans le cas  $u = +E$  et indiquer les intervalles durant lesquels les diodes  $D_1$  ou  $D_3$  sont passantes.

ii. On définit le taux de distorsion harmonique d'un signal (écart au caractère sinusoïdal) par le rapport :

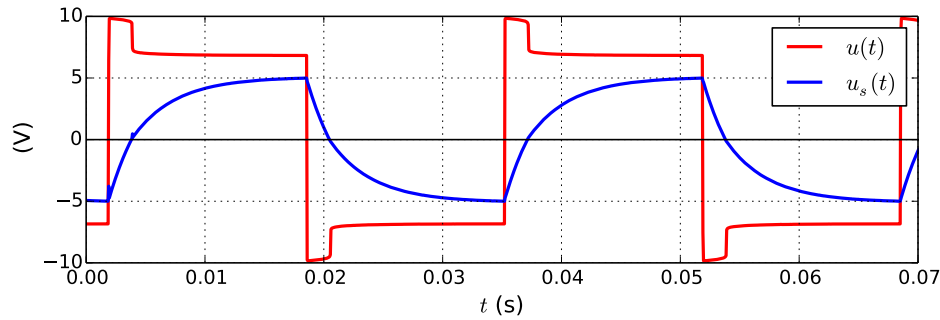
$$T_{HD} = 100 \times \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

avec  $V_i$  les grandeurs efficaces des différents harmoniques du signal.

À l'aide des indications du spectre de  $u_s$ , évaluer le taux de distorsion en courant.

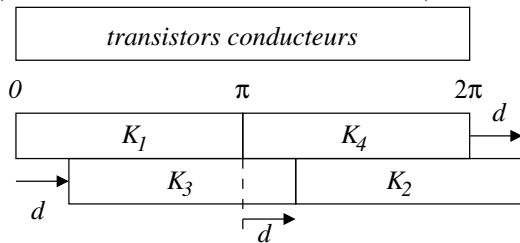
Comparer, en considérant les mêmes harmoniques, au taux de distorsion du signal créneau avant filtrage.

(f) En réalité, les courbes expérimentales ont la forme suivante :



Proposer une explication.

3. **Commande décalée** : on considère maintenant une commande décalée. L'état des transistors  $K_1$  et  $K_4$  est complémentaire, il en est de même de  $K_3$  et  $K_2$ . Les deux commandes sont, contrairement au cas précédent, décalées d'un angle  $d$  (la période  $T_d$  correspondant à  $2\pi$ ) selon le schéma suivant :



(a) Donner l'allure de la tension  $u(t)$ .

(b) On admet que cette tension peut être décomposée sous la forme :

$$u(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_{2n+1} \sin[(2n+1)\omega_d t] \quad \text{avec} \quad b_{2n+1} = \frac{2E}{\pi(2n+1)} [1 + \cos((2n+1)d)]$$

Expliquer l'intérêt de retenir  $d = \pi/3$  pour l'angle de décalage.

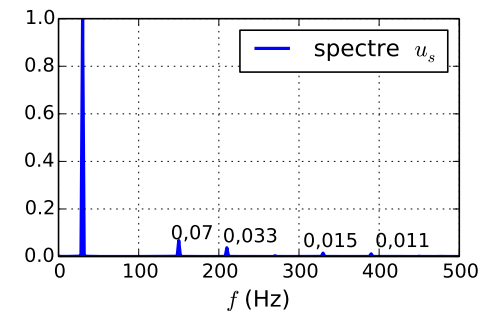
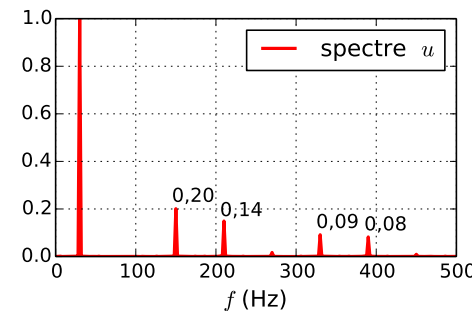
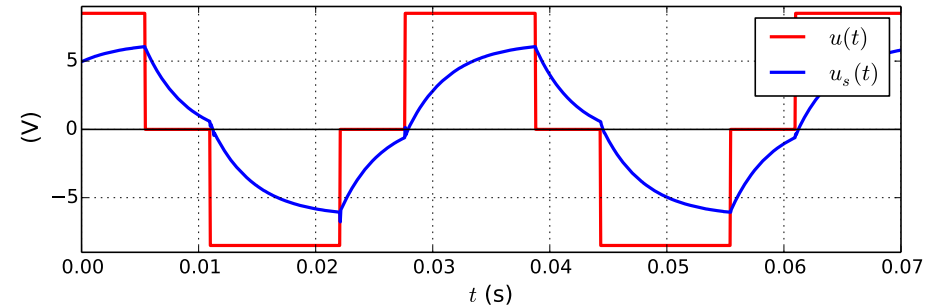
(c) Avec un angle de décalage  $d = \pi/3$ , et avec la même charge que précédemment, on obtient les courbes ci-contre (les spectres sont normalisés).

Évaluer le taux de distorsion harmonique des deux signaux. Comparer au cas précédent de la commande symétrique.

**Réponses** : 1(a) :  $H_0 = \frac{R}{R+r}$ ,  $\omega_c = \frac{R+r}{L}$ ; 1(b) :  $r = 11 \Omega$ ,  $L \approx 0,18 \text{ H}$ ;

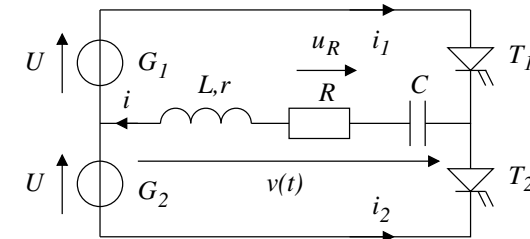
2(b) :  $b_3/b_1 = 1/3$ ,  $b_5/b_1 = 1/5$ ; 2(c) :  $B_{2n+1} = b_{2n+1} \times \frac{H_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{(2n+1)\omega_d}{\omega_c}\right)^2}}$ ;

2(d) :  $\frac{B_3}{B_1} = 0,17$ ,  $\frac{B_5}{B_1} = 0,065$ ; 2(e,ii) :  $T_{HD,I} = 22\%$ ,  $T_{HD,u} = 43\%$ ; 3(b) : suppression harmonique de rang 3; 3(c) :  $T_{HD,u} = 27\%$ ,  $T_{HD,I} = 8\%$



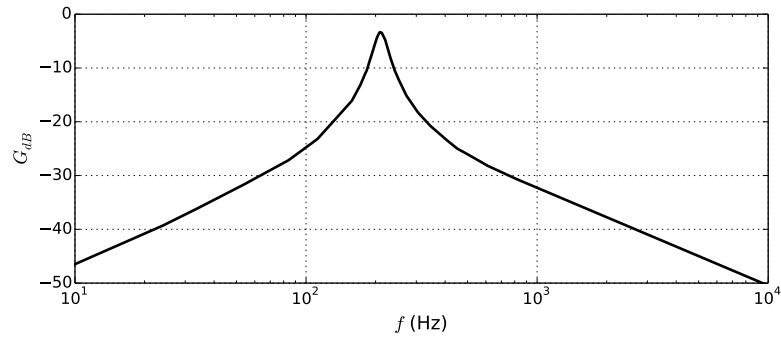
### CP081. Onduleur à charge résonante (\*\*)

Le schéma de principe suivant est celui d'une alimentation destinée à fournir un courant  $i(t)$  sinusoïdal à la charge  $RL$ , à partir de deux sources de tension continues  $G_1$  et  $G_2$  de même f.e.m.  $U$ .



On adjoint, à la charge  $RL$  précédente, un condensateur de capacité  $C$  placé en série comme indiqué sur le schéma.

Des mesures expérimentales ont permis d'obtenir le diagramme de Bode en amplitude pour la fonction de transfert  $\underline{H} = \frac{u_r}{v}$  :

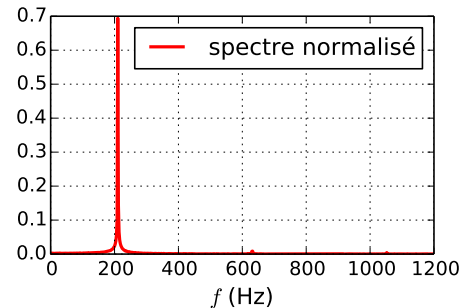
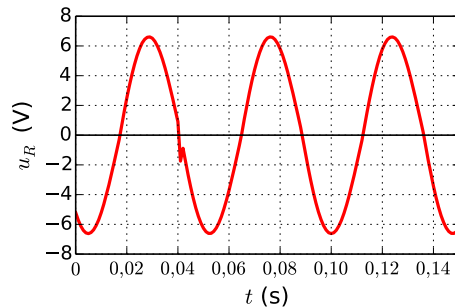
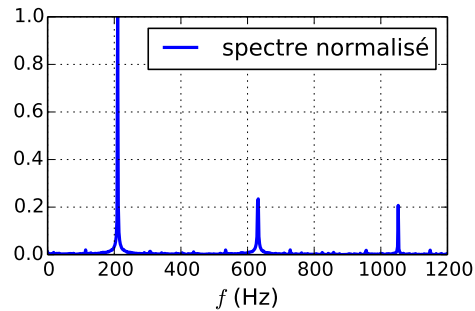
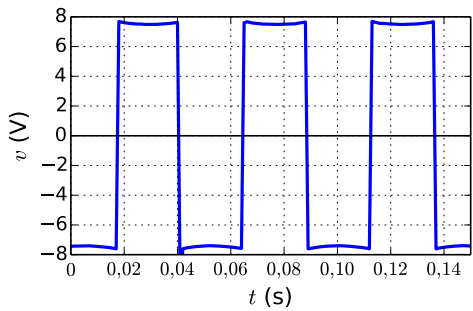


Le convertisseur continu/alternatif est appelé onduleur.

$T_1$  et  $T_2$  sont deux interrupteurs électroniques supposés parfaits et unidirectionnels. Le contrôle de leur conduction est périodique (période  $T_0$ , fréquence  $f_0 = 1/T_0 = 210$  Hz) et s'effectue selon la séquence suivante :

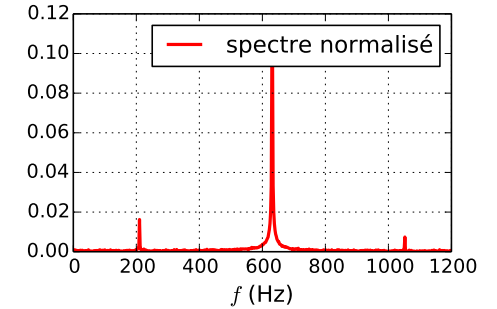
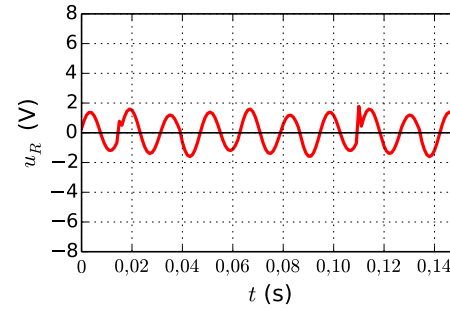
- $0 < t < T_0/2$  :  $T_1$  conducteur,  $T_2$  bloqué ;
- $T_0/2 < t < T_0$  :  $T_1$  bloqué,  $T_2$  conducteur.

1. Les figures suivantes présentent les tensions  $v(t)$  et  $u_R(t)$  ainsi que les spectres en fréquence normalisés sur le signal  $v$  :



Expliquer.

2. Sans modifier les autres paramètres, la valeur de la capacité du condensateur passe de  $C_1 = 2,13 \mu\text{F}$  (première expérience) à  $C_2 = 0,24 \mu\text{F}$  (nouvelle expérience), on obtient alors le signal suivant pour la tension aux bornes de la résistance  $R$ .



Expliquer.