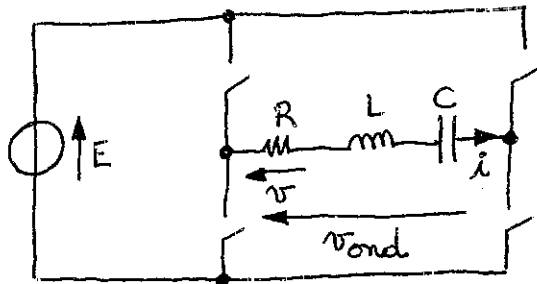


**EXAMEN D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

**1<sup>ère</sup> PARTIE: convertisseurs à résonance (14pts)**

**A/ ONDULEUR à RESONANCE SERIE**

On considère l'onduleur à résonance ci-dessous. On supposera le fonctionnement proche de la résonance de telle sorte que le courant  $i$  puisse être considéré comme sinusoïdal. Une grandeur  $X$  correspond à la valeur efficace du vecteur  $\underline{X}$ .



**A.1 Diagramme de fonctionnement (2pts)**

Tracer le diagramme de Fresnel correspondant aux grandeurs de sorties  $\underline{E}_1, \underline{V}$  et  $\underline{I}$  ( $E_1$ =fondamental de  $v_{ond}$ ) dans le cas où la fréquence de fonctionnement de l'onduleur est supérieure à la fréquence propre du circuit oscillant  $\omega_0$  (on rappelle que  $\omega_0=1/(LC)^{1/2}$ ).

**A.2 Fonctionnement en court-circuit : (2pts)**

Donner l'expression de la valeur efficace du courant de court-circuit  $I_{cc}$  (obtenue lorsque  $v=0$ ). Quelle est alors la phase du courant  $i$  par rapport à  $v_{ond}$  ?

**A.3 Puissance de sortie: (4pts)**

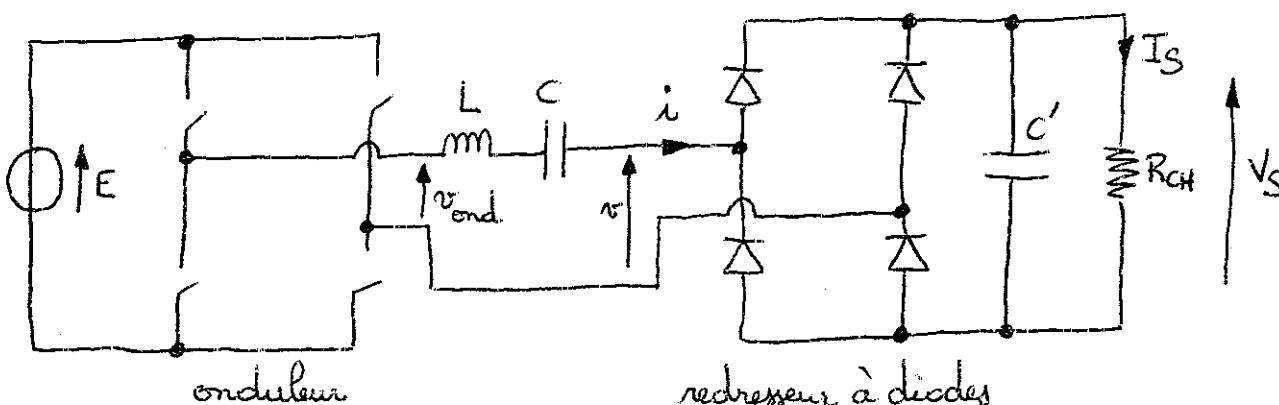
A partir du diagramme vectoriel, donner la relation liant  $\underline{E}_1, \underline{V}, \underline{I}$  et  $\underline{I}_{-cc}$ . En déduire la relation liant  $E_1, V, I$  et  $I_{cc}$ . Mettre cette relation sous la forme  $a^2+b^2=1$  puis tracer l'allure de  $V$  en fonction de  $I$ .

**A.4 Utilisation : (1pt)**

L'onduleur à résonance étudié est utilisé comme chauffage à induction. L'inductance  $L$  sert donc à faire circuler des courants de Foucault dans la pièce à chauffer. A quoi correspond la résistance  $R$  ?

**B/ CONVERTISSEUR DC-DC à RESONANCE**

Dans le montage précédent, on remplace la résistance  $R$  par une association : pont de diodes+condensateur+résistance  $R_{CH}$  pour réaliser un convertisseur Continu-Continu (montage ci-dessous).



Le courant  $i$  est toujours supposé sinusoïdal. On note  $V_1$  le fondamental de  $v$ .

**B.1 Formes d'onde:** (2pts)

En supposant la tension de sortie parfaitement filtrée ( $V_s$  continue), donner l'allure de  $v(t)$  et  $i(t)$ .

Donner alors la relation liant  $V_1$  et  $V_s$  (on rappelle que l'amplitude du fondamental d'un signal carré  $E$  vaut  $4E/\pi$ ).

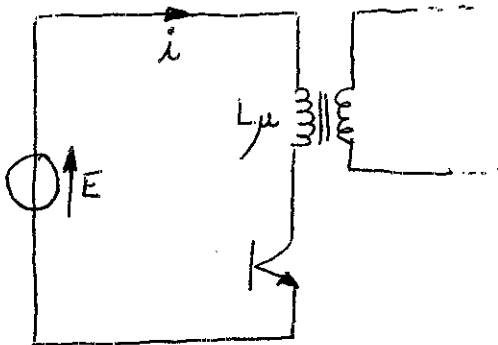
**B.2 Puissances:** (3 pts)

Donner l'expression de la puissance active  $P$  fournie au pont redresseur en fonction de  $R_{CH}$  et  $I$  (On rappelle que la valeur moyenne d'un signal sinusoïdal redressé d'amplitude  $Y_{max}$  vaut  $2Y_{max}/\pi$ ).

A partir de la relation obtenue, en déduire à quoi est équivalent l'ensemble : pont de diodes+condensateur+ $R_{CH}$ .

**2<sup>ème</sup> PARTIE: Alimentations à découpage Flyback (6pts)**

On se propose d'étudier le circuit de magnétisation du transformateur d'isolation d'une alimentation à découpage (Flyback) donné ci-dessous :

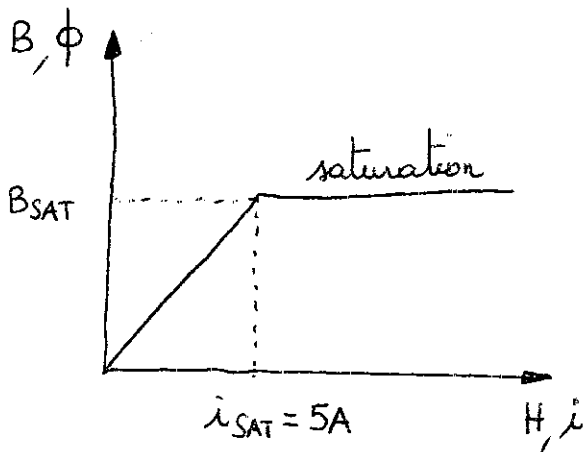


**C.1 Magnétisation du circuit magnétique du transformateur d'isolation:** (2 pts)

Tracer la forme d'onde du courant de magnétisation du transformateur (on note  $t_f$  le temps de fonctionnement du transistor pendant une période  $T$ ). ( Démagnétisation complète )

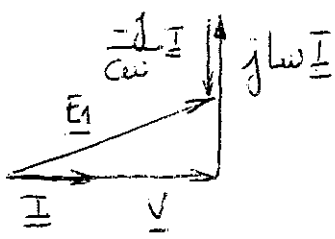
**C.2 Limites de fonctionnement:** (3 pts)

On donne la courbe simplifiée  $B(H)$  du circuit magnétique du transformateur utilisé :





(A-1)



(2pts)

(A-2)

$$\underline{E}_1 = \underline{V} + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\underline{I}$$

en court-circuit  $\underline{V} = 0$  d'où  $\underline{E}_1 = j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\underline{I}_{cc}$  soit  $\underline{I}_{cc} = \frac{\underline{E}_1}{j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)}$  (1pt)

$i$  en retard de  $\pi/2$  /  $E_1$  (ou  $v$ ond) (1pt)

(A-3)

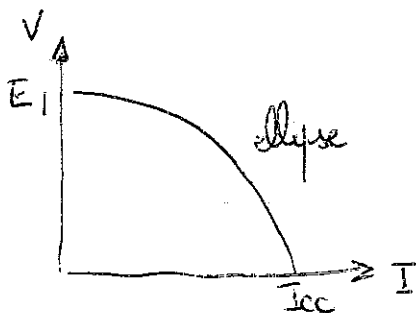
$$\underline{E}_1 = \underline{V} + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\underline{I}$$

$$\underline{E}_1 = \underline{V} + \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{cc}} \underline{I} \quad (1pt)$$

$$\underline{E}_1 = \underline{V} + j \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{cc}} \underline{I}$$

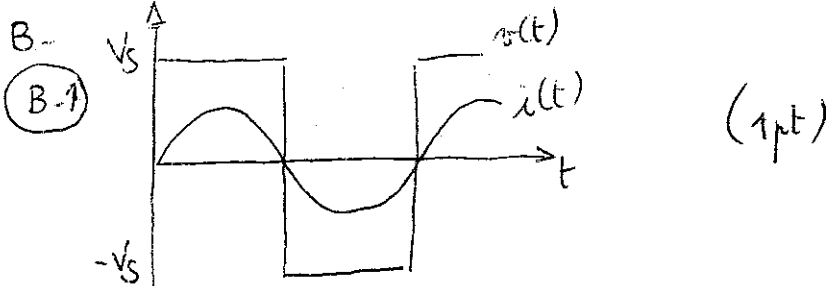
$$\text{soit } E_1^2 = V^2 + \frac{E_1^2}{I_{cc}^2} I^2$$

$$\frac{V^2}{E_1^2} + \frac{I^2}{I_{cc}^2} = 1 \Rightarrow \left(\frac{V}{E_1}\right)^2 + \left(\frac{I}{I_{cc}}\right)^2 = 1 \quad (2pts)$$



(1pt)

(A-4)  $R$  correspond aux pertes fer dues aux courants de Foucault dans la pièce à chaud (1pt)



$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2}\pi} \quad (1pt)$$

B-2

$$P = V_1 I$$

$$= \frac{4V_s}{\sqrt{2}\pi} I$$

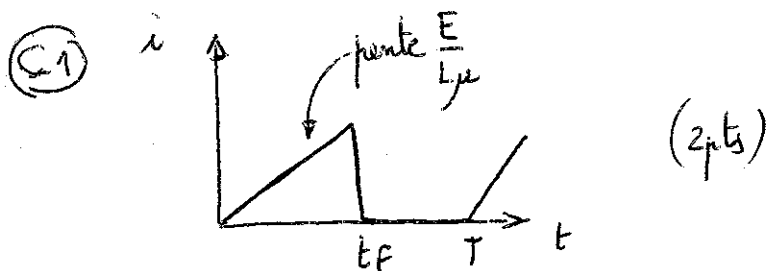
$$= \frac{4R_{CH} I_S}{\sqrt{2}\pi} I$$

or  $I_S = I_{RED\text{moyen}} = \frac{2I_{max}}{\pi} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I$ ,

d'où  $P = \frac{4R_{CH}}{\sqrt{2}\pi} I \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I$

$$P = \frac{8}{\pi^2} R_{CH} I^2 \quad (2pts)$$

$P = r' I^2$  } ensemble diodes +  $C' + R_{CH}$  = résistance (fondamental) (1pt)



C-2

$$i = \frac{E}{L_\mu} t \text{ sat } i_{SAT} = \frac{E}{L_\mu} \cdot \frac{T}{2} \text{ d'où } T = \frac{2i_{SAT} \cdot L_\mu}{E} \quad \underline{AN: f = 20\text{kHz}} \quad (2pts)$$

si  $f < f_{limite} \rightarrow$  saturation du transfo  $\rightarrow$  E en court-circuit (1pt)

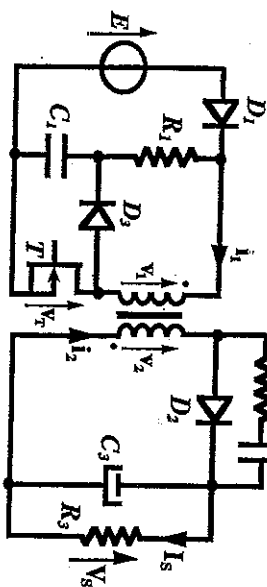
C-3

Surtections aux bornes de T à l'ouverture due à l'énergie accumulée dans les inductances de fuite (1pt)

**EXAMEN D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**  
(avec documents)

**Alimentation à découpage à accumulation**  
(les questions 1,2 et 3 sont indépendantes)

On considère l'alimentation à découpage à accumulation étudiée en TP, dont le schéma est donné ci-dessous :

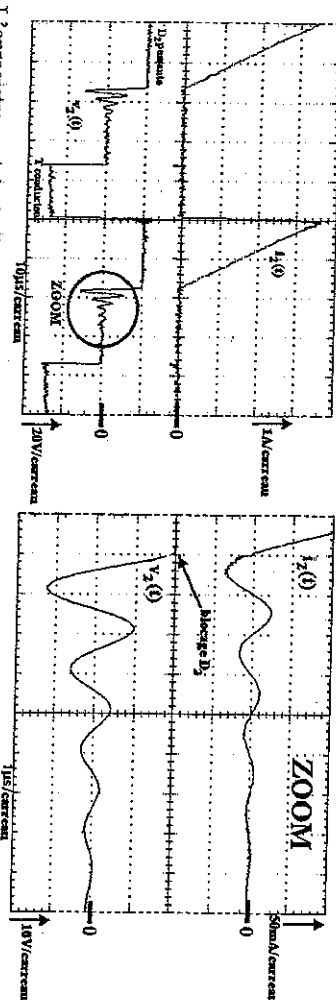


Les valeurs des différents composants sont :  $n_1/n_2=1$  ;  $L_1=L_2=L$  (inductances magnétisantes) = 110μH ;  $E=30V$  ;  $R_1=1,8k\Omega$  ;  $R_2=150\Omega$  ;  $R_3=33\Omega$  ;  $C_1=100nF$  ;  $C_2=860pF$  ;  $C_3=470\mu F$ . Le point de fonctionnement étudié (démagnétisation complète) est le suivant :  $V_s=20V$  ;  $\alpha=0,27$  ;  $f=20kHz$ .

**1 - Rôle des éléments  $R_2$ - $C_2$  aux bornes de  $D_2$  : (9 pts)**

On se propose de déterminer le rôle des éléments  $R_2$ - $C_2$  placés aux bornes de la diode  $D_2$ .

Les formes d'ondes de  $v_1(t)$  et  $i_1(t)$  sont reportées dans les enregistrements ci-dessous :



L'enregistrement de droite correspond au blocage de  $D_2$  (ZOOM).

**1.1 - Circuit équivalent : (2 pts)**

Tracer le circuit correspondant au secondaire du transformateur à l'ouverture de  $D_2$ . On supposera que le condensateur  $C_3$  est assimilable à une source de tension de 20V. Le bobinage secondaire du transformateur

est constitué de deux inductances en série ( $L=$  inductance magnétisante et  $L_f$  inductance de fuite). On néglige la capacité parasite de la diode  $D_2$  devant  $C_2$ .

**1.2 - Régimes libres et forcés : (2 pts)**

Tracer les schémas du régime libre et du régime forcé après le blocage de la diode  $D_2$ .

**1.3 - Plan de phase : (2 pts)**

Tracer dans le plan de phase  $\left( \begin{matrix} i_{L1} \\ i_{L2} \end{matrix} ; \begin{matrix} V_{C2} \\ V_{C3} \end{matrix} \right)$  l'évolution de ces grandeurs au blocage de la diode  $D_2$ .

On prendra  $i_{L1}$  dans le même sens que  $i_2$  et le potentiel positif de  $V_{C2}$  vers l'anode de  $D_2$ .

**1.4 - Valeur de  $i_f$  : (1 pt)**

A partir de l'enregistrement ZOOM, déterminer  $\omega_0$  et par suite la valeur de  $i_f$ .

**1.5 - Surtension : (1 pt)**

En négligeant en première approximation la résistance  $R_2$ , donnez la valeur de la tension maximale apparaissant aux bornes de  $D_2$  en fonction de  $V_s$ .

**1.6 - Rôle des éléments  $R_2$ - $C_2$  aux bornes de  $D_2$  : (1 pt)**

Déduire du 1.5 le rôle de ces éléments.

**2 - Rôle des éléments  $R_1$ - $C_1$ - $D_3$  : (6 pts)**

On se propose de déterminer le rôle des éléments  $R_1$ - $C_1$ - $D_3$  placés au primaire du transformateur.

**2.1 - Calculs préliminaires : (2 pts)**

On cherche à calculer la surtension à l'ouverture apparaissant aux bornes du transistor T sans les éléments  $R_1$ - $C_1$ - $D_3$ . Dès la décroissance du courant la tension  $v_{T1} = L \cdot di/dt$  devient nettement supérieure à  $V_s$  entraînant ainsi instantanément l'amorçage de  $D_2$ .

Déterminer l'expression de la tension  $V_T$  aux bornes du transistor à l'ouverture en fonction de  $E$ ,  $V_s$ ,  $L_f$  et  $di/dt$ .

Pour le point de fonctionnement étudié, donnez la valeur numérique de  $V_T$ . On prendra  $di/dt = -10^8 A/s$ . Conclusion.

**2.2 - Amorçage de la diode  $D_3$  : (2 pts)**

Quel est l'état de la diode  $D_3$  lorsque T est passant ?

Déterminer la tension aux bornes de  $D_3$  lorsque le transistor T s'ouvre en fonction de  $E$ ,  $V_{C1}$ ,  $L_f$  et  $di/dt$ .  $eV_s$  Compte-tenu de la forte valeur négative du terme  $di/dt$ , conclure sur l'amorçage de la diode  $D_3$ .

**2.3 - Rôle du condensateur  $C_1$  : (2 pts)**

Lorsque  $D_3$  s'amorce, donnez la nouvelle relation obtenue entre  $E$ ,  $V_{C1}$ ,  $L_f$  et  $di/dt$ .  $eV_s$

Quelle doit être la relation que doit satisfaire la tension  $V_{C1}$  :  $(E+V_s) < V_{C1}$ , ou  $(E+V_s) > V_{C1}$  ? pour que le condensateur limite bien la surtension à l'amorçage à  $V_T = V_{C1}$  ?

Pour ce point de fonctionnement, on mesure  $V_{C1} = 60V$ . Comparez avec la valeur obtenue au 2.1.

3 - Bilan énergétique: (5 pts)

3.1 - Energie stockée: (2pts)

Déterminer l'expression de l'énergie stockée  $\mathcal{E}$  dans le circuit magnétique à chaque cycle en fonction de  $E_s$ ,  $\alpha$ ,  $i_{2max}$  et  $f$ .

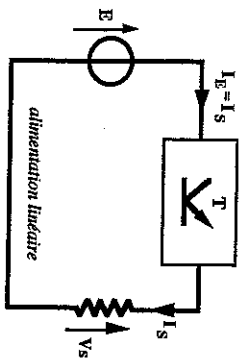
Donner la valeur numérique de  $\mathcal{E}$  pour le point de fonctionnement étudié.

3.2 - Rendement: (3 pts)

Déterminer l'expression du rendement  $\eta$  de l'alimentation en fonction de  $V_s$ ,  $I_s$ ,  $E$  et  $I_{2max}$ .

Donner la valeur numérique pour le point de fonctionnement étudié.

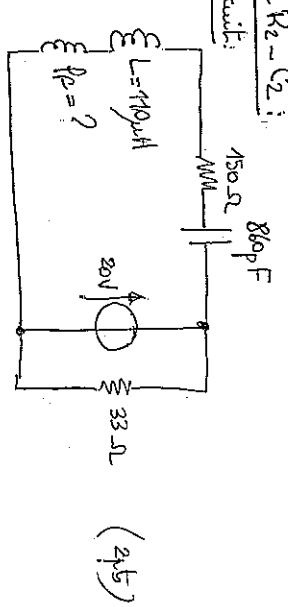
Comparer ce rendement (en valeur numérique) avec celui d'une alimentation linéaire (schéma ci-dessous) délivrant la même tension  $V_s$  et le même courant  $I_s$  à partir de la même source  $E$ .



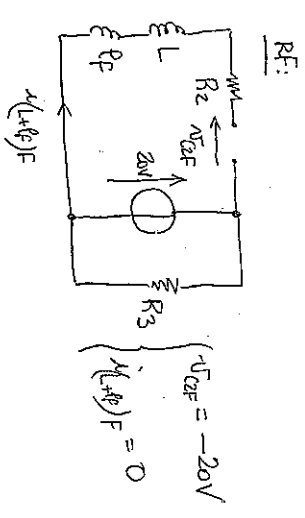
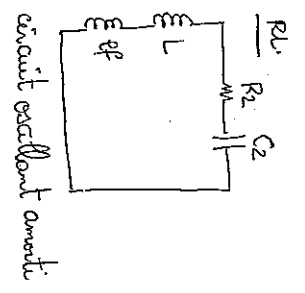
février 2004 :

Rôle de  $R_2 - C_2$  :

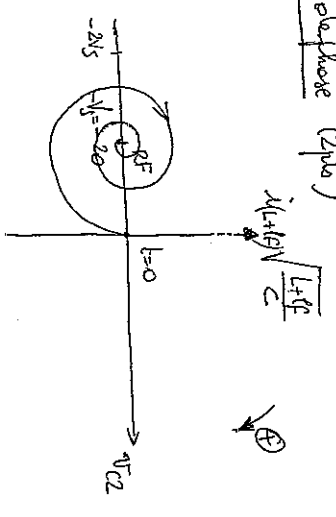
1.1 - circuit :



1.2  $R_L + R_F$  (2pts)



1.3 Plan de phase (2pts)



1.4  $\epsilon_F$  (1pt)

$\omega_0 = 2\pi \cdot 500 \cdot 10^3 \text{ rad.s}^{-1}$   
 $f_{02} = 500 \text{ kHz}$   
 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L+CF)C_2}}$   
 $f_{02} \approx 8 \mu\text{H}$

1.5 - Surtension (1pt)

$V_2 = V_{D2 \text{ max}}$  ( $R_2$  négligée) =  $-2V_s$

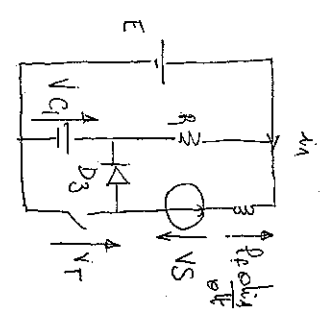
1.6 Rôle de  $R_2 - C_2$  (1pt)

limiter la surtension aux bornes de  $D_2$  à son ouverture  
 (occasionnée par la présence de  $C_F$ )

(+ limiter le  $dV/dt$  aux bornes de  $D_2$  au blocage de celle-ci)

2 - Rôle de  $R_1 - C_1 - D_3$  (6pts)

2.1 - calculs préliminaires : (2pts)



$V_T = E + V_s - \frac{P_{di1}}{C_1 F}$   
 $4N : V_T = 30 + 20 - (8 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^8 = 850 \text{ V}$   
 conclusion : surtension dangereuse.

2.2 Amortissement  $D_3$  (2pts)

$T$  important  $\rightarrow D_3$  bloquée  $V_{D3} < 0$   
 $E = P_{di1} - V_s + V_{D3} + V_{C1}$  soit  $V_{D3} = E + V_s - V_{C1} - \frac{P_{di1}}{C_1 F}$   
 $<< 0$  donc amortis, ok  $D_3$

2.3 Rôle de  $C_1$  (2pts)

$E = P_{di1} - V_s + V_{C1}$  limitation de  $V_T \rightarrow \frac{P_{di1}}{C_1 F} = E + V_s - V_{C1}$   
 donc  $V_{C1} > E + V_s$  tension  $D_3$  se bloque



- 60V << 850V!

3. Bilan énergétique. (5pts)

$$E = \int_0^T E_{i_1} dt$$

$$= E \int_0^1 i_1(t) dt$$

$$= E \int_0^1 i_{1max} dt \quad \text{or } i_1 = i_2 \text{ donc } i_1 max = i_2 max$$

$$E = \frac{E}{2} i_2 max \cdot T = \frac{E}{2} i_2 max$$

AN:  $E \approx 730 \mu J$

3.2 Rendement (3pts)

$$\eta = \frac{V_s I_s}{E \cdot i_1 max} = \frac{2 V_s I_s T}{E i_2 max \cdot T} = \boxed{\frac{2 V_s I_s}{E i_2 max} = \eta}$$

AN:  $\eta = 83\%$   
FLYBACK

$$\eta_{AL} = \frac{V_s I_s}{E I_s} = \frac{V_s}{E} = \frac{20}{30} = 66\% < \eta_{FLYBACK}$$

**EXAMEN D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

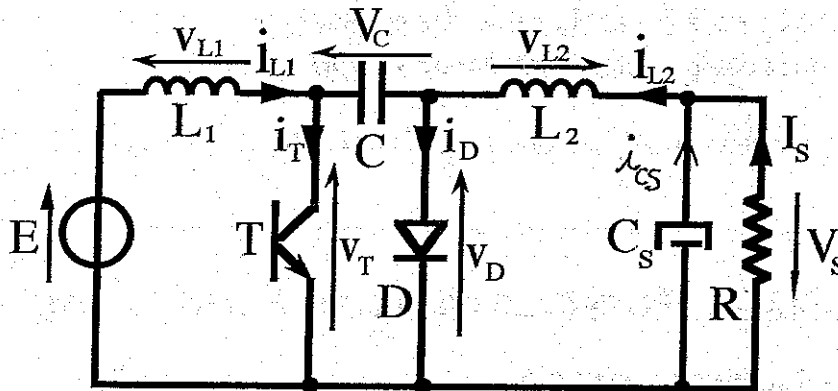
**Document autorisé : 1 feuille Recto Verso manuscrite**

*Les 2 parties sont indépendantes.*

**1<sup>ère</sup> PARTIE: Hacheur à stockage capacitif (13pts) + (2pts) BONUS**

**1.1/ Principe de fonctionnement (6pts)**

On considère le convertisseur Continu-Continu à stockage capacitif, dont le montage est le suivant :



Le principe de fonctionnement est décomposable en 2 phases :

- **PHASE 1** : accumulation d'énergie dans  $L_1$  (T passant et D bloquée) et transfert d'énergie de C vers  $L_2$  et la charge
- **PHASE 2** : transfert d'énergie de  $L_1$  dans C (T bloqué et D passante)
- Etc

On supposera que les tensions  $V_C$  et  $V_S$  sont continues. On se place dans le cas d'un fonctionnement en conduction continue de courant (fonctionnement en source de tension).

Donner la relation entre  $E$ ,  $v_{L1}$  et  $v_T$ . En déduire la relation entre les valeurs moyennes de ces trois tensions. (1pt)

Donner la relation entre  $V_S$ ,  $v_{L2}$  et  $v_D$ . En déduire la relation entre les valeurs moyennes de ces trois tensions. (1pt)

Tracer les formes d'onde de  $v_T$  et  $v_D$ . On prendra  $\alpha=0,25$  ( $\alpha$ =rapport cyclique de conduction du transistor T). (1pt)

Déduire des formes d'ondes de  $v_T$  et  $v_D$  les valeurs moyennes de  $v_T$  et  $v_D$  en fonction de  $V_C$ . (1pt)

Déduire la valeur de  $V_S$  en fonction de  $E$  et  $\alpha$ . (1pt)

Donner la relation entre  $E$ ,  $v_{L1}$ ,  $V_C$ ,  $v_{L2}$  et  $V_S$ . En déduire la relation entre les valeurs moyennes de ces trois tensions. En déduire la valeur de  $V_C$  en fonction de  $E$  et  $\alpha$ . (1pt)

### 1.2/ Couplage des inductances (4pts)

Donner la valeur de  $v_{L1}$  et celle de  $v_{L2}$  en fonction de  $E$  pendant la phase de conduction du transistor T. En déduire la relation entre  $v_{L1}$  et  $v_{L2}$ . (1pt)

Donner la valeur de  $v_{L1}$  et celle de  $v_{L2}$  en fonction de  $V_S$  pendant la phase de blocage du transistor T. En déduire la relation entre  $v_{L1}$  et  $v_{L2}$ . (1pt)

On souhaite coupler ces deux inductances sur le même circuit magnétique. Tracer le schéma de câblage de ces deux inductances en notant le sens des courants  $i_{L1}$  et  $i_{L2}$  ainsi que le pointage des enroulements. (1pt)

Dans le cas d'un couplage sur un même circuit magnétique, quel doit être le rapport entre le nombre de spires de  $L_1$  et de  $L_2$ ? (1pt)

### 1.3/ Ondulation de la tension de sortie (3pts)

Donner la relation entre  $i_{L2}$  et  $i_{CS}$ . (1pt)

Tracer la forme d'onde de  $i_{CS}$  en indiquant la valeur des pentes. (1pt)

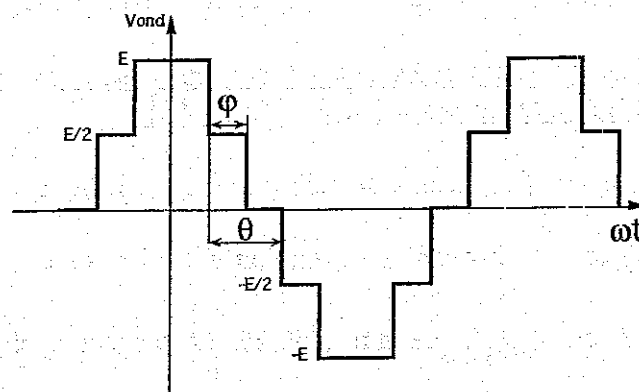
Tracer la forme d'onde de la composante alternative de  $V_S$ . (1pt)

**BONUS (2pts):** donner la valeur de  $\Delta V_S$  en fonction de  $E, \alpha, L_2, C_S$  et  $f$  (fréquence de fonctionnement).

## 2<sup>ème</sup> PARTIE: Filtrage des onduleurs de tension (7pts)

### 2.1/ Filtrage actif - Onduleur 5 niveaux

On se propose de réaliser un filtrage actif de la tension de sortie d'un montage onduleur de tension monophasé, en associant 2 onduleurs à 3 niveaux à commandes décalées. Cette association permet d'obtenir une tension de sortie ayant la forme suivante :



#### 2.1.1/ Calcul des coefficients de Fourier de la tension de sortie (2pts)

Compte-tenu de la forme d'onde de  $V_{ond}$ , calculez les coefficients de Fourier  $A_n$  et  $B_n$ . On choisira la fonction paire. Les règles de calcul des  $A_n$  et  $B_n$  sont données en annexe.

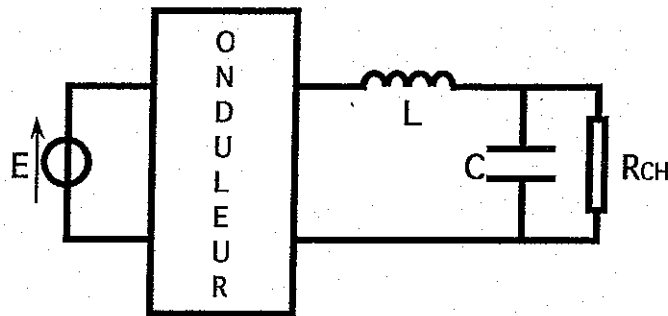
### 2.1.2/ Annulation des premiers harmoniques (2pt)

Déterminer les valeurs que doivent prendre  $\varphi$  et  $\theta$  pour éliminer les harmoniques de rangs 3 et 5.

## 2.2/ Filtrage passif- Filtre LC

### 2.2.1/ Calcul de la fréquence de résonance du filtre (1pt)

On utilise un filtre LC passe-bas afin d'atténuer les harmoniques de la tension de sortie d'un onduleur 50Hz à commandes MLI. La fréquence de découpage de l'onduleur est de 2,5kHz. Le montage réalisé est le suivant :



Déterminer la valeur de la pulsation de résonance  $\omega_0$  du filtre permettant d'obtenir une atténuation d'un facteur 100 à 2,5kHz.

### 2.2.2/ Calcul du filtre LC (1pt)

$L=3\text{mH}$ , calculer alors la valeur de  $C$ .

### 2.2.3/ Influence de la charge (1pt)

L'amplitude du fondamental de la tension de sortie du filtre peut être affecté à la fois par la position de  $\omega_0$  par rapport à  $\omega_{\text{fond}}$  et par la valeur de la charge  $R_{\text{CH}}$ . On peut néanmoins estimer que si  $\omega_{\text{fond}}/\omega_0$  est de l'ordre de 1/5, seule la charge pourra influencer le fondamental de la tension. Calculer  $\omega_{\text{fond}}/\omega_0$  et déduire si cette condition est remplie.

---

**ANNEXE** : calcul des  $A_n$  et  $B_n$  :

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(n\omega t) + B_n \cdot \sin(n\omega t))$$

$$A_0 = \text{valeur moyenne} ; A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot dt ; B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt$$

- Symétrie glissante  $f(t+T/2) = -f(t)$ : pas d'harmoniques de rang pair
- Fonction paire : pas de termes en sinus
- Réunion de : symétrie glissante et pair: simplification : calcul des

$$A_{2k+1} = \frac{8}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} f(t) \cdot \cos((2k+1)\omega t) \cdot dt$$

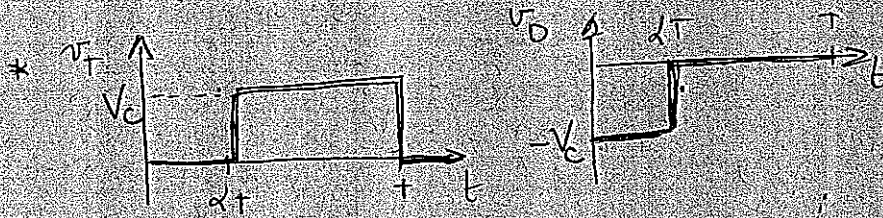
# Machine à stockage capacitif

1.1 \*  $E = v_u(t) + v_T(t)$

$\Rightarrow E = \langle v_T \rangle$

\*  $V_S + v_D(t) = -v_D(t)$

$\Rightarrow -V_S = \langle v_D \rangle$



$V_S = d \cdot \frac{E}{1-d}$

\*  $\langle v_T \rangle = V_C(1-d)$       $\langle v_D \rangle = -dV_C$

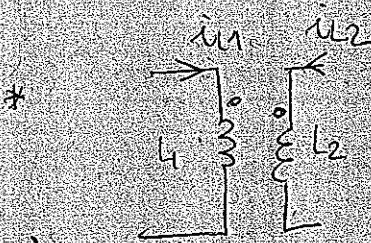
\*  $E = v_{L1}(t) + V_C + -v_{L2}(t) - V_S$

$E = V_C - V_S$

$V_C = E + V_S = E + \frac{dE}{1-d} = E \left( \frac{1}{1-d} \right)$

1.2  $\left\{ \begin{array}{l} v_{L1} = E \\ v_{L2} = V_C - V_S = E \left( \frac{1}{1-d} \right) - \frac{dE}{1-d} = E \end{array} \right\} v_{L1} = v_{L2}$

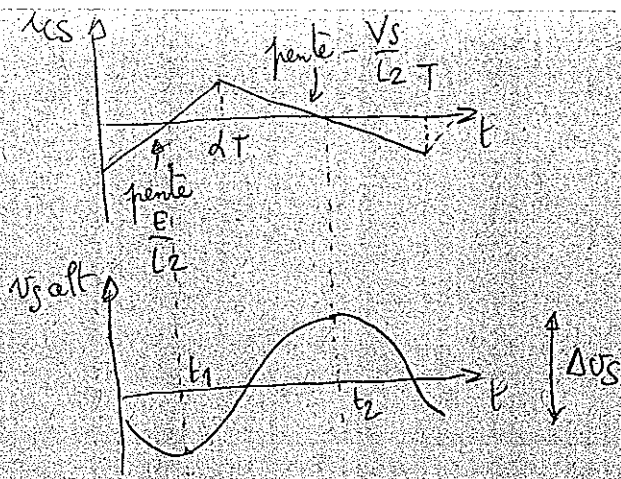
\*  $\left\{ \begin{array}{l} v_{L1} = E - V_C = -V_S \\ v_{L2} = -V_S \end{array} \right\} v_{L1} = v_{L2}$



\*  $n_1 = n_2$

1.3  $\left\{ \begin{array}{l} i_{L2}(t) = i_{CS}(t) + I_S \\ i_{CS}(t) = i_{L2} \text{ alternatif} \end{array} \right.$





BONUS: 
$$\Delta v_s = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} \Delta i_{cs} dt = \frac{V_s}{8C_s L_2 f^2}$$

## 2.1 - Filtrage actif

2.1.1 
$$A_{2h+1} = \frac{4E}{(2h+1)\pi} \cdot \sin\left[(2h+1)\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right)\right] \cdot \cos\left[(2h+1)\frac{\varphi}{2}\right]$$

2.2.2  $\theta = \frac{\pi}{3} \rightarrow \text{rang } 3$   
 $\varphi = \frac{\pi}{5} \rightarrow \text{rang } 5$

## 2.2 Filtrage passif

2.2.1 filtre LC  $\Rightarrow$  pente 40 dB/décade  $\Rightarrow$  atténuation de 100/décade

d'où 
$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot 25 \cdot 10^3}{10} = 1570 \text{ rad/s}$$

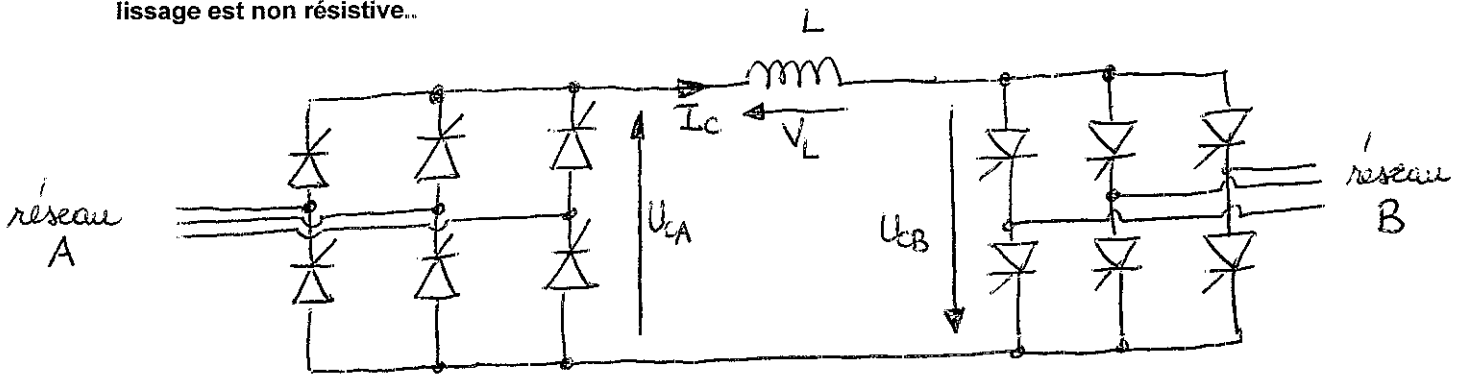
2.2.2  $C = 135 \mu\text{F}$

2.2.3  $\frac{\omega_{\text{fond}}}{\omega_0} = \frac{1}{5} \rightarrow$  condition remplie

**EXAMEN D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**  
**(1 page A4 R/V autorisée uniquement)**

**1<sup>ère</sup> PARTIE : Echange d'énergie entre deux réseaux asynchrones (12 pts)**

On considère le montage ci-dessous permettant d'échanger de l'énergie électrique entre deux réseaux asynchrones de même fréquence. En fonction du sens de transit désiré pour cette énergie, les deux convertisseurs fonctionneront l'un en redresseur, l'autre en onduleur. **On considère dans tous le problème que le courant  $I_c$  est parfaitement continu, que les semi-conducteurs sont parfaits et que l'inductance de lissage est non résistive..**



**1/ Relation entre les tensions: (2 pts)**

Donner la relation entre  $U_{CA}$ ,  $U_{CB}$ ,  $V_L$  et  $I_c$ . Compte tenu de l'hypothèse concernant la forme d'onde de  $I_c$ , en déduire la relation liant  $U_{CA}$  et  $U_{CB}$

**2/ Dimensionnement du câble à courant continu: (2 pts)**

Le réseau A est un réseau triphasé 50Hz, 120kV entre phases. Déterminer la valeur de la tension continue  $U_{CA}$  lorsque l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\psi_A$  du convertisseur A est nul. On rappelle que la tension

de sortie de ce type de convertisseur est donnée par la relation :  $U_c = 2 \frac{q}{\pi} V_M \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos(\psi)$ , où q est le nombre de phases du réseau alternatif et  $V_M$  la valeur crête d'une tension simple de ce réseau

**3/ Fonctionnement : (3 pts)**

Pour un angle de retard à l'amorçage  $\psi_A$  valant  $+30^\circ$  pour le convertisseur A, déterminer la valeur de la tension  $U_{CA}$  ainsi que la valeur de l'angle de retard à l'amorçage  $\psi_B$  du convertisseur B (le réseau B est un réseau 160kV entre phases).

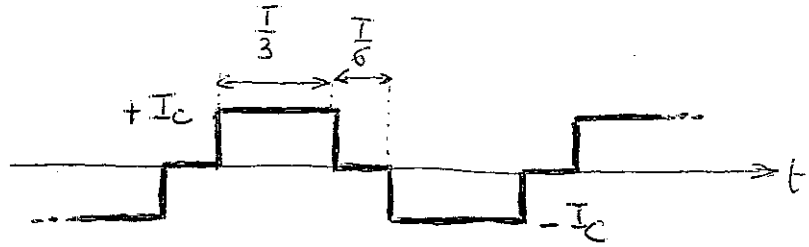
Compte tenu des valeurs de  $\psi_A$  et  $\psi_B$ , déterminer le convertisseur qui fonctionne en redresseur et celui qui fonctionne en onduleur.

Le convertisseur fonctionnant en onduleur est-t-il assisté ou autonome ? Pourquoi ?

**4/ Dimensionnement en courant des câbles du réseau A : (3 pts)**

On suppose un fonctionnement à  $\psi_A = +10^\circ$  sur le convertisseur A, en déduire la valeur du courant  $I_c$ , sachant que la puissance échangée entre les deux réseaux est de 100MW.

On rappelle l'allure d'un courant de ligne :



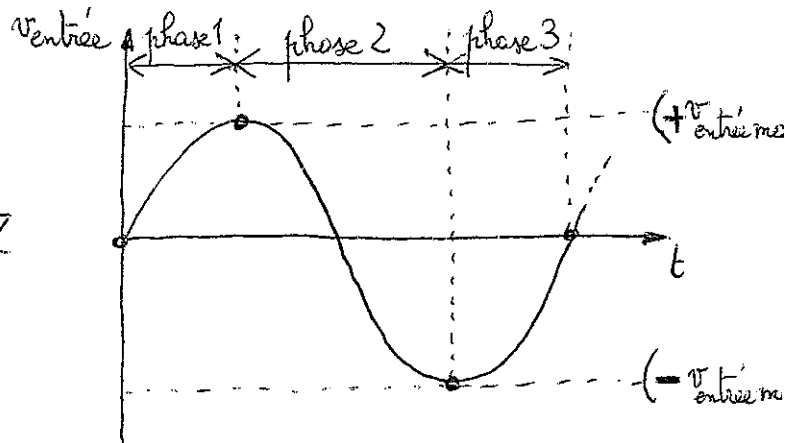
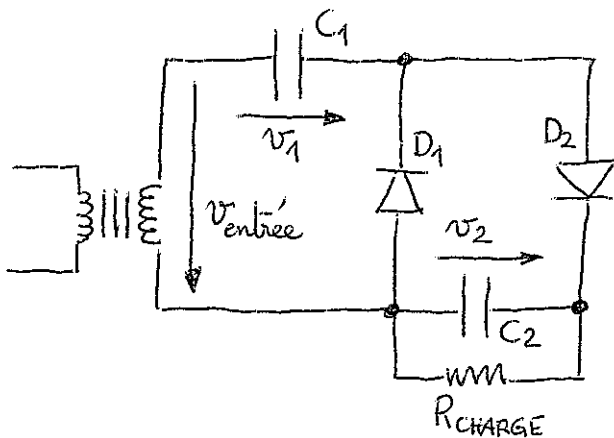
Déterminer la valeur efficace d'un courant de ligne  $I_{eff}$  en fonction de  $I_C$  et donner sa valeur numérique.

5/ Réversibilité de l'échange d'énergie: (2 pts)

On souhaite inverser le sens de transfert de l'énergie sans modifier le schéma de câblage des deux convertisseurs (comme indiqué sur la première figure). Expliquer les réglages à effectuer pour le changement de sens de transit de l'énergie échangée

## 2<sup>ème</sup> PARTIE : Convertisseur AC-DC à diodes et condensateurs (8 pts + Bonus : 2pts)

On considère le montage ci-dessous:



On suppose qu'initialement tous les condensateurs sont déchargés ( $v_1=v_2=0$  à  $t=0$ ). La tension  $v_{entrée}$  est supposée sinusoïdale. **On suppose que tout condensateur chargé garde sa charge dans le temps. La résistance  $R_{charge}$  est très élevée et peut être retirée du montage pour la résolution du problème.**

On a décomposé la mise sous tension de ce montage en trois phases (schéma de droite).

1/ Phase 1 (3 pts)

On suppose qu'à la mise sous tension du transformateur, la tension  $v_{entrée}$  commence par être positive.

Quelles sont les diodes qui conduisent et celles qui sont bloquées lorsque la tension  $v_{entrée}$  commence à croître ?

Comment évolue les tensions  $v_1$  et  $v_2$  jusqu'à ce que  $v_{entrée}$  atteigne  $+v_{entrée max}$  ?

Quelles sont les diodes qui commutent lorsque  $v_{entrée}$  atteint  $+v_{entrée max}$  ?

2/ Phase 2: (3 pts)

Lorsque la tension  $v_{entrée}$  commence à décroître, comment évolue la tension  $v_2$  ?

Donner les valeurs de  $v_2$  lorsque  $v_{entrée}$  prend successivement les valeurs :  $+v_{entrée max}$ , 0 et  $-v_{entrée max}$ .

3/ Phase 3: (2 pts)

Quelles sont les diodes qui commutent lorsque  $v_{entrée}$  évolue de  $-v_{entrée max}$  à 0 ?

Donner la valeur de  $v_2$  à la fin de la phase 3.

4/ Application (BONUS : 2 pts)

Compte tenu de la relation entre  $v_2$  (tension aux bornes de  $R_{charge}$ ) et  $v_{entrée max}$  et sachant que plusieurs cellules (Diode + Condensateur) peuvent être rajoutées en série ( $C_3-D_3$ ,  $C_4-D_4$ ,  $C_5-D_5$ ,...) donnez la fonction d'un tel convertisseur AC-DC.



pt 2005

1<sup>ère</sup> partie

1/  $U_{CA} = V_L - U_{CB} = \langle L \frac{dI_C}{dt} \rangle - U_{CB} = -U_{CB}$

2/  $U_{CA} \approx 162 \text{ kV}$

3/  $U_{CA} = -U_{CB}$

$140 \text{ kV} = -\cos \psi_B \cdot 216 \text{ kV}$

$\psi_B = +130^\circ$

$\psi_A < 90^\circ \rightarrow A$  fonctionne en redresseur

$\psi_B > 90^\circ \rightarrow B$  fonctionne en onduleur assisté (c'est le réseau B qui impose la fréquence et l'amplitude des tensions)

4/  $U_{CA} \approx 160 \text{ kV} \rightarrow P = U_{CA} \cdot I_C \rightarrow I_C = 625 \text{ A}$

$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_C \rightarrow I_{\text{eff}} = 510 \text{ A}$

5/  $I_C$  ne change pas de sens donc  $U_{CA}$  et  $U_{CB}$  doivent changer de signe -  
D'où  $\psi_A$  et  $\psi_B$  doivent être réglés pour que A fonctionne en onduleur et B en redresseur ( $\psi_A > 90^\circ$  et  $\psi_B < 90^\circ$ )

2<sup>ème</sup> partie

1/ Phase 1:

$v_1 = v_2 = 0$  à  $t=0$

\*  $v_{\text{entrée}} > 0$  → amorçage  $D_1 \rightarrow C_1$  se charge →  $D_2$  reste bloquée ( $v_{D2} < 0$ )  
(car  $v_{D1} = v_{\text{entrée}}$ )

\* à  $v_{\text{entrée}} = v_{\text{entrée max}}$  →  $v_1 = v_{\text{entrée max}}$  →  $v_{D1} = v_1 - v_{\text{entrée}}$  donc  
 $D_1$  se bloque,  $C_1$  reste chargé à  $v_{\text{entrée max}}$

$$v_{D2} = v_1 - v_{\text{entrée}} - v_2$$

lorsque  $v_{\text{entrée}} = v_{\text{entrée max}} \rightarrow v_1 = v_{\text{entrée max}}$  et  $v_2 = 0 \rightarrow$  D2 s'amorce

2/ Phase 2:

D2 étant amorcé  $\rightarrow C_2$  se charge :  $v_2 = v_1 - v_{\text{entrée}}$

comme  $v_1 = v_{\text{entrée max}} \rightarrow v_2$  évolue de 0 ( $v_{\text{entrée}} = v_{\text{entrée max}}$ ) à

$v_{\text{entrée max}}$  ( $v_{\text{entrée}} = 0$ ) jusqu'à  $+2v_{\text{entrée max}}$  ( $v_{\text{entrée}} = -v_{\text{entrée max}}$ )

Pendant la phase 2, D1 reste bloquée car  $v_{D1} = -v_2 < 0$

3/ Phase 3:

lorsque  $v_{\text{entrée}} = -v_{\text{entrée max}}$  :  $v_{D2} = v_1 - v_2 - v_{\text{entrée}}$  ; D2 se bloque

$\uparrow$   $+v_{\text{entrée max}}$       $\uparrow$   $+2v_{\text{entrée max}}$       $\downarrow$  décroît

$v_{D1} = v_{\text{entrée}} - v_1 < 0$  ; D1 reste bloquée

$\uparrow$   $+v_{\text{entrée max}}$

4/ \*  $v_2 = v_{\text{charge}} = +2v_{\text{entrée max}} \rightarrow$  montage redresseur doubleur de tension  
 \* avec plusieurs cellules en +  $\rightarrow$  " " " multiplicateur de tension

