

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR EN  
ÉLECTROTECHNIQUE**

**E4 - Physique Appliquée  
à l'électrotechnique**

**Durée : 4 heures**

**coefficient : 3**

**Calculatrice autorisée**

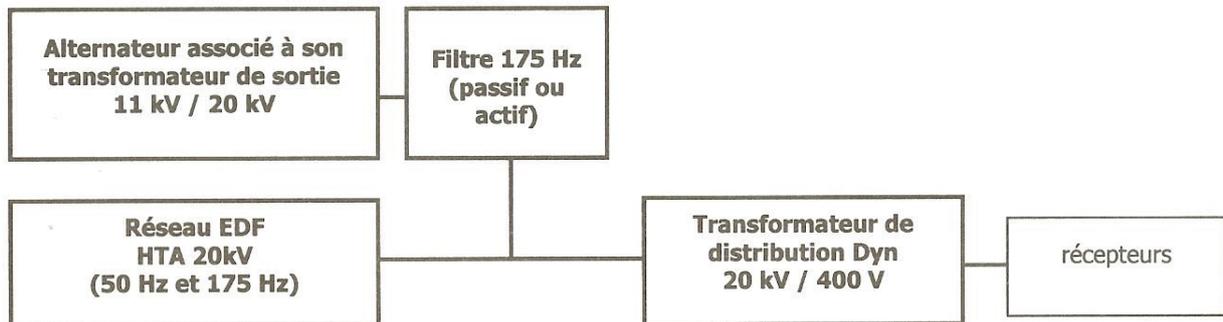
# PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE ET RACCORDEMENT AU RESEAU

*Ce problème est constitué de trois parties indépendantes*

## Présentation

Ce problème s'intéresse à une usine d'incinération de déchets qui pratique la cogénération d'énergie électrique : l'énergie d'origine thermique produite à tous les niveaux du processus industriel est récupérée et convertie par des turbo-alternateurs en énergie électrique destinée à la consommation propre du site et éventuellement à la revente.

Le raccordement au réseau E.D.F. de l'unité de production d'énergie électrique impose un certain nombre de contraintes liées à la qualité des tensions produites et à leur influence sur le réseau.



Le synoptique ci-dessus situe les parties étudiées :

- **Partie A** : étude de l'alternateur couplé au réseau, dans le cas d'un fonctionnement à puissance nominale.
- **Partie B** : étude de l'influence du couplage Dyn d'un transformateur triphasé, placé entre le réseau HTA et la distribution BTA, sur la circulation de courants harmoniques de rang 3 (150 Hz).
- **Partie C** : étude d'un système de filtrage entre l'installation et le réseau :
  - La **partie C1** propose l'étude d'un filtre passif.
  - La **partie C2** analyse le comportement d'un filtre actif série constitué d'un onduleur de tension associé à un transformateur d'injection.

**Dans chaque partie, de nombreuses questions peuvent être traitées de manière autonome.**

*Les grandeurs électriques instantanées sont notées en lettres minuscules.*

*Les grandeurs majuscules représentent des valeurs efficaces ou continues.*

*Dans le cas où la grandeur  $h(t)$  est sinusoïdale, on lui associe la grandeur complexe  $H(j\omega)$  et un vecteur*

*$\vec{H}$ .*

## Partie A : Etude de l'alternateur triphasé en régime sinusoïdal au fonctionnement nominal.

La plaque signalétique de l'alternateur triphasé donne les indications nominales suivantes :

$$\begin{aligned} S_n &= 40\,000 \text{ kVA} \\ N_n &= 1500 \text{ tr/min} \\ f &= 50 \text{ Hz} \\ U_n &= 11,0 \text{ kV} \quad \text{couplage étoile sans neutre.} \end{aligned}$$

La régulation de l'excitation de l'alternateur (figure A1) permet de maintenir constants le facteur de puissance ( $k = \cos \varphi_a = 0,80$ ) et la valeur efficace des tensions.

La fréquence de rotation est constante.

La machine est non-saturée.

L'angle  $\varphi_a$  est tel que l'alternateur fournit de la puissance réactive au réseau.

La figure A2 (page suivante) représente le modèle équivalent par phase de l'alternateur,  $V_a$  désignant la tension simple.

La réactance synchrone  $X_a$  par phase est telle que le produit ( $X_a \cdot I_{an}$ ) calculé au fonctionnement nominal a pour valeur 6600 V.

La réactance synchrone est constante, la résistance des enroulements statoriques est négligée.

- A1. Calculer le nombre  $2p$  de pôles de l'alternateur.
- A2. Calculer la puissance active  $P_n$  et la puissance réactive  $Q_n$  fournies au régime nominal.
- A3. Exprimer l'intensité nominale  $I_n$  du courant en ligne. Calculer sa valeur numérique.
- A4. Calculer la valeur de  $X_a$  ; en déduire celle de  $L_a$ .
- A5. Ecrire en notation complexe la relation liant les grandeurs  $\underline{E}_a$ ,  $X_a$ ,  $\underline{I}_a$  et  $\underline{V}_a$ .
- A6. La tension simple  $v_a(t)$  est choisie comme référence des phases :
  - A6.1. Pour le fonctionnement nominal, tracer sur la figure A3 (document réponse n°1), le vecteur  $\vec{V}_a$ , la direction et le sens du courant  $\vec{I}_a$  puis le vecteur  $\vec{E}_a$  (on adoptera l'échelle 1000 V/cm).
  - A6.2. Relever sur le diagramme la valeur efficace  $E_{an}$  ainsi que l'angle  $\theta_{an}$  que font les vecteurs  $\vec{E}_a$  et  $\vec{V}_a$ . Donner le nom de cet angle.

$U_n = 11 \text{ kV}$   
 $S_n = 40\,000 \text{ kVA}$   
 $\cos \varphi_n = 0,80$   
 $N_n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$   
 $f_a = 50 \text{ Hz}$

figure A1

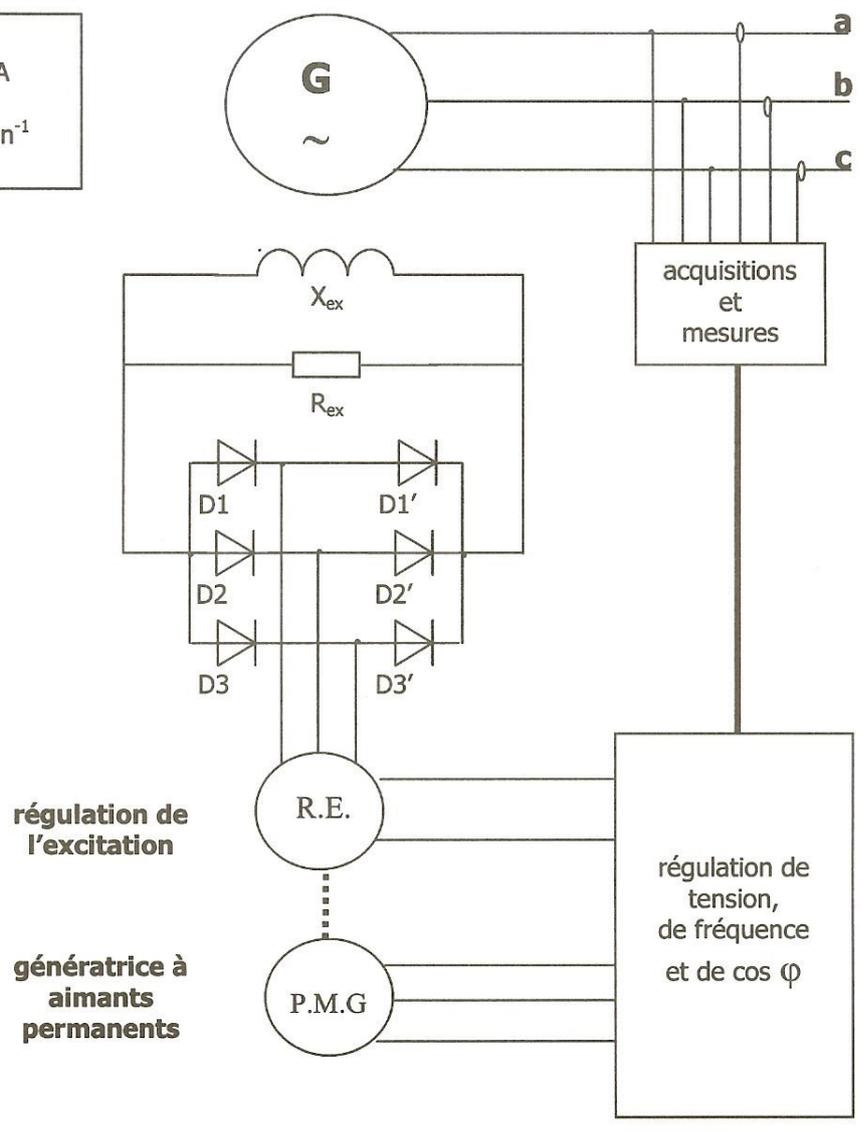
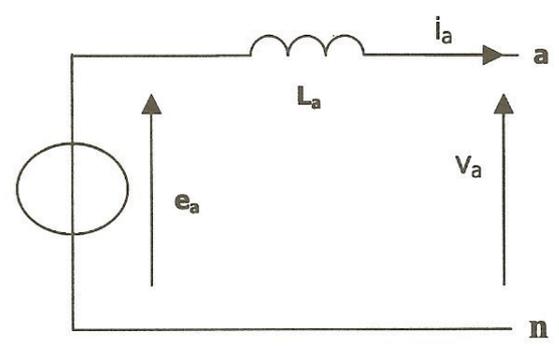


figure A2



on pose  $X_a = L_a \cdot \omega$

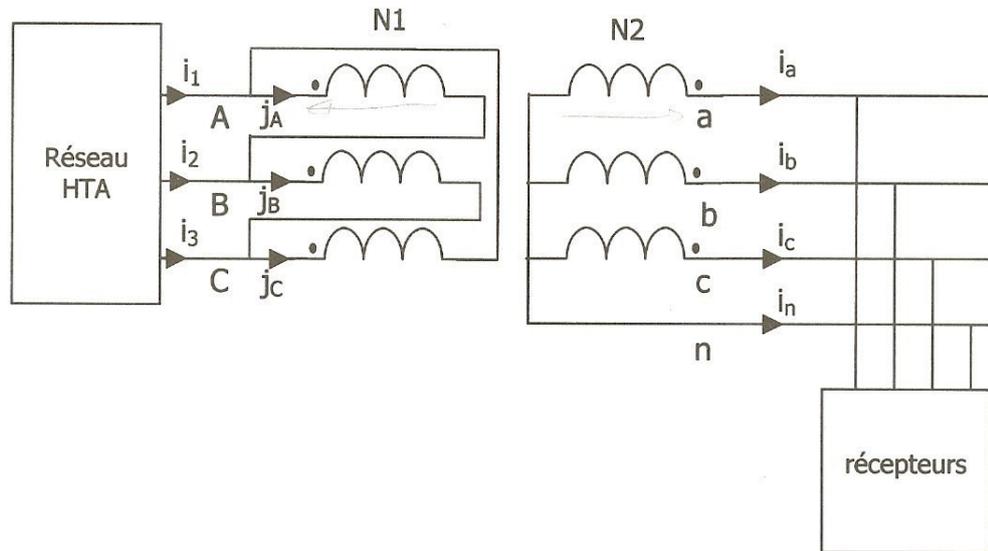
## Partie B : Rôle du transformateur triphasé placé entre le réseau HTA et la distribution BTA.

Le réseau HTA délivre des tensions sinusoïdales formant un système triphasé équilibré direct ( $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_1 = 20 \text{ kV}$ ). Il alimente le primaire d'un transformateur abaisseur de tension, de couplages triangle au primaire et étoile avec neutre au secondaire. Le secondaire délivre un système triphasé équilibré direct de tensions de valeur efficace  $U_2 = 400 \text{ V}$ .

Chaque colonne porte un enroulement primaire de  $N_1$  spires et un enroulement secondaire de  $N_2$  spires.

Le transformateur est supposé parfait. La figure B1 précise la désignation des différents courants et les conventions adoptées.

figure B1



### B1. Caractéristiques du transformateur.

- B1.1. Déterminer le rapport  $m_c$  de transformation par colonne du transformateur.
- B1.2. Déterminer, en le justifiant, l'indice horaire  $I_h$  du transformateur.

### B2. Premier cas de fonctionnement : l'ensemble des récepteurs constitue une charge linéaire triphasée équilibrée.

Les courants  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$  sont alors sinusoïdaux. On a  $i_a(t) = I_a \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$  avec  $I_a = 900 \text{ A}$  et  $f = 50 \text{ Hz}$ .

Exprimer  $i_n(t)$  en fonction de  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$ . En déduire la valeur de  $i_n(t)$ .

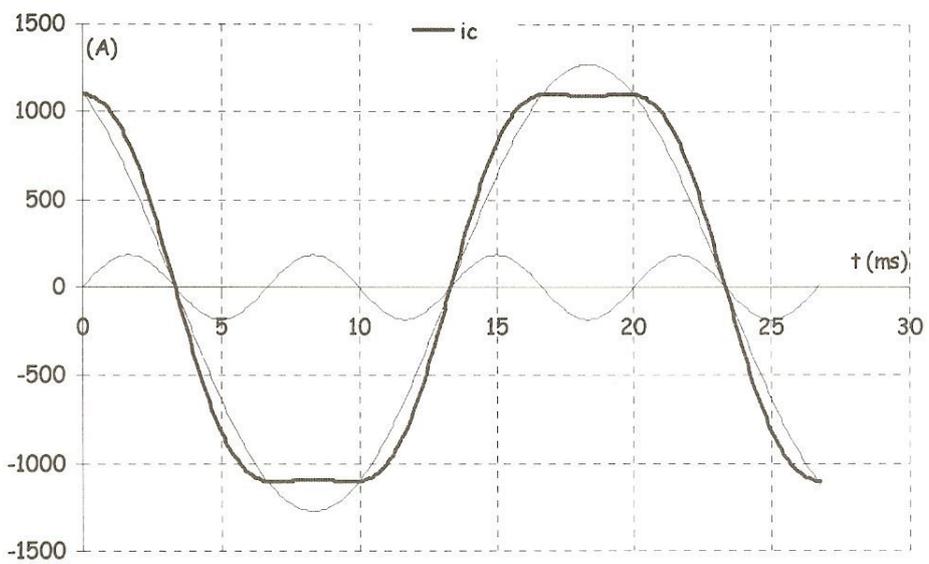
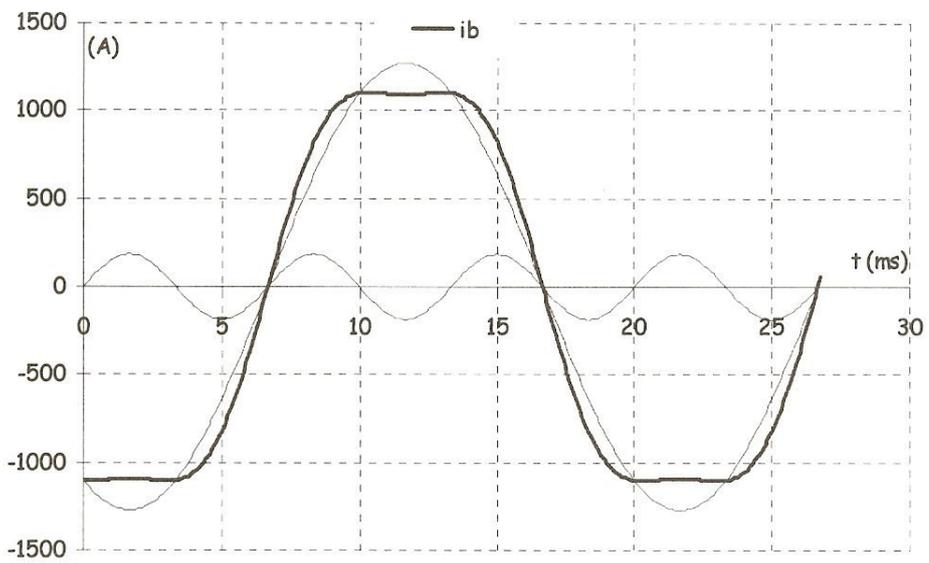
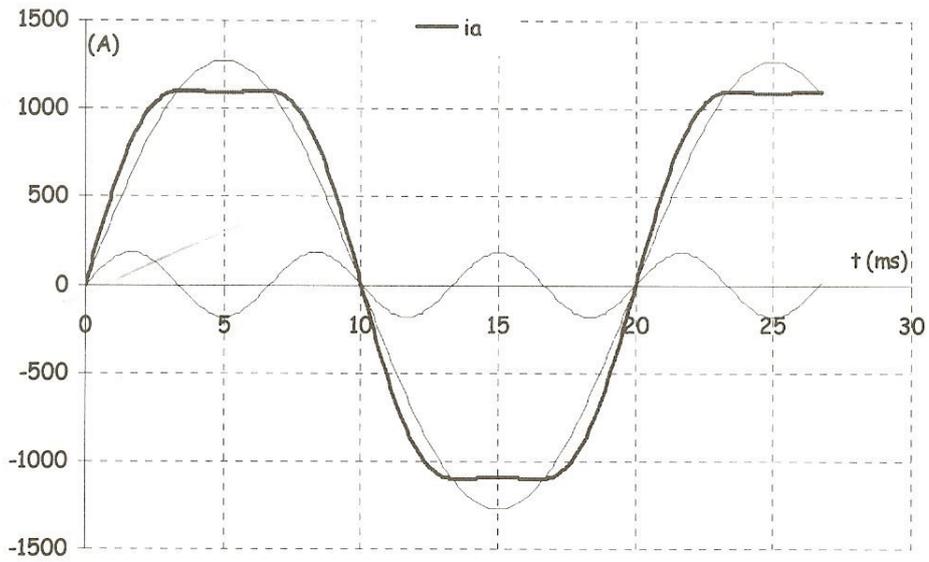
### B3. Deuxième cas de fonctionnement : les récepteurs constituent une charge non-linéaire triphasée équilibrée. Chaque courant en ligne au secondaire résulte de la superposition d'un courant fondamental de fréquence 50 Hz et de courants harmoniques de fréquences multiples.

On ne prend en compte que les harmoniques de rang 3, les autres rangs sont négligés. Le courant  $i_a(t)$  (figure B2) a alors pour expression  $i_a(t) = I_{a1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) + I_{a3} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t)$ , avec  $I_{a1} = 900 \text{ A}$  et  $I_{a3} = 130 \text{ A}$ .

Les courants  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$  formant toujours un système triphasé équilibré,  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$  s'obtiennent en remplaçant respectivement  $\omega \cdot t$  par  $(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3})$  et par  $(\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3})$ .

- B3.1. Vérifier, en exprimant  $i_b(t)$  et  $i_c(t)$ , que les trois composantes de rang 3 sont en phase, comme le montre la figure B2.
- B3.2. Ecrire la loi des nœuds au point n. En déduire l'expression de  $i_n(t)$ . Tracer son allure sur la figure B3 du document réponse n°2. Donner sa valeur efficace.
- B3.3. Etablir que les courants dans les enroulements primaires ont pour expression  $j_A(t) = 0,0115 \cdot i_a(t)$ ,  $j_B(t) = 0,0115 \cdot i_b(t)$  et  $j_C(t) = 0,0115 \cdot i_c(t)$ .
- B3.4. Ecrire la loi des nœuds au point A. En déduire l'expression du courant  $i_1(t)$ .
- B3.5. En déduire l'intérêt de ce couplage pour le réseau HTA.

**figure B2**

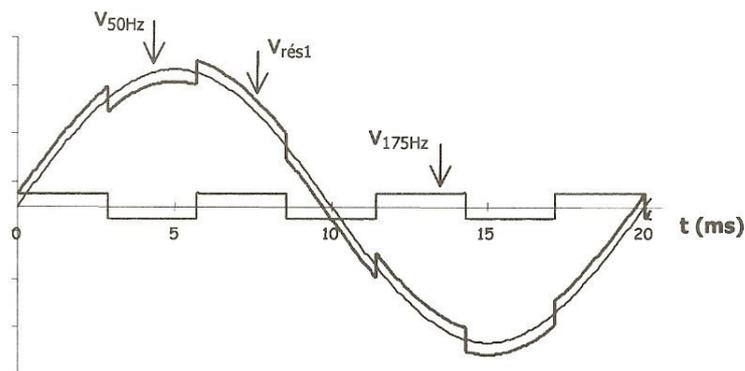


## Partie C : Influence de l'installation sur la circulation de signaux de commande à 175 Hz présents sur le réseau.

EDF utilise un système de télécommande qui permet depuis les centres de distribution en HTA de déclencher le changement de tarif des compteurs d'énergie ainsi que, par exemple, la gestion de l'allumage et de l'extinction de l'éclairage public.

Lors de l'émission des signaux, chaque tension simple imposée par le réseau triphasé est la superposition de la tension sinusoïdale  $v_{50\text{Hz}}(t)$  de valeur efficace  $V_{50\text{Hz}}$  et d'une tension alternative en créneaux  $v_{175\text{Hz}}(t)$  de valeur efficace  $V_{175\text{Hz}}$ . On a  $v_{\text{rés1}}(t) = v_{50\text{Hz}}(t) + v_{175\text{Hz}}(t)$ . La figure C1 montre le principe pour la phase 1 (les proportions entre les tensions ne sont pas respectées, dans la réalité,  $V_{175\text{Hz}}$  est égale à 2,3% de  $V_{50\text{Hz}}$ ).

figure C1

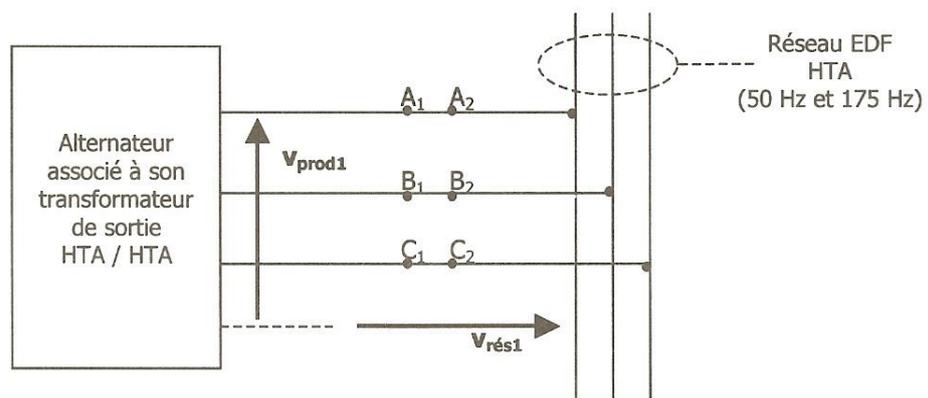


L'installation de production présente pour les signaux de fréquence 175 Hz une impédance trop faible, entraînant une chute de leur amplitude. Il faut donc prévoir un système de filtrage entre cette installation et le réseau. Les éléments des filtres sont insérés entre les points  $A_1$  et  $A_2$ ,  $B_1$  et  $B_2$ ,  $C_1$  et  $C_2$  comme le montre la figure C2 ci-dessous.

Deux solutions vont être envisagées :

- un filtrage passif,
- un filtrage actif.

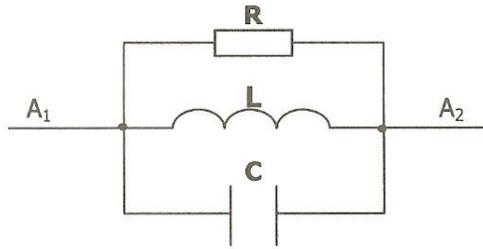
figure C2



### C1 Filtrage passif des signaux de commande présents sur le réseau.

Le filtre est constitué de trois cellules passives identiques insérées sur chaque phase. La structure ci-dessous représente la cellule sur la phase A.

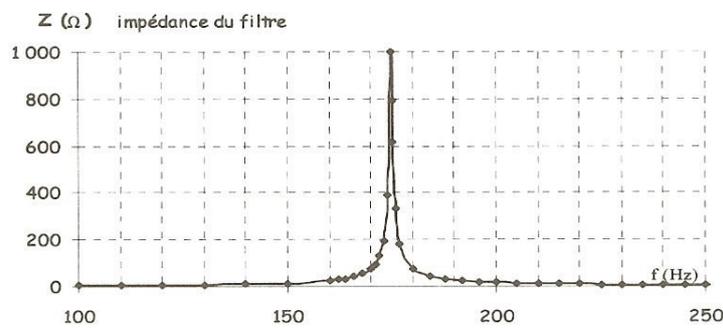
figure C3



On note  $\underline{Z}$  l'impédance complexe du dipôle  $A_1A_2$ .

Le graphique ci-dessous (figure C4) donne l'évolution du module  $Z$  de  $\underline{Z}$  en fonction de la fréquence  $f$  pour un fonctionnement en régime sinusoïdal à fréquence variable.

figure C4



On rappelle que :

- l'admittance complexe d'un dipôle est définie par  $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$ ,  $\underline{Z}$  étant son impédance complexe ;
- les admittances de dipôles en parallèle s'ajoutent.

- C1-1. Ecrire l'admittance complexe de chaque composant R, L et C. En déduire l'admittance complexe du circuit sous la forme  $\underline{Y} = A + j.B$ , A et B étant fonction de R, L, C et de la pulsation  $\omega$ .
- C1-2. Montrer que son module  $Y$  passe par un minimum  $Y_{\min}$  pour la pulsation particulière  $\omega_0$ . Exprimer  $\omega_0$  en fonction de L et C. Exprimer  $Y_{\min}$ . En déduire l'impédance  $Z_{\max}$  correspondante.
- C1-3. Relever sur la figure C4 la valeur maximale  $Z_{\max}$  et la fréquence correspondante.
- C1-4. On donne  $L = 4,0$  mH. Déterminer les valeurs de R et C.
- C1-5. L'ensemble constitué de l'alternateur et de son transformateur de sortie présente pour chaque phase, à la fréquence de 175 Hz, une impédance série inférieure à 35  $\Omega$ . Conclure sur l'intérêt de ce filtre pour le réseau HTA.

### C2 Filtrage actif des signaux de commande présents sur le réseau.

Le filtre actif (ou compensateur actif) est constitué d'un onduleur de tension triphasé à transistors IGBT associé à un transformateur d'injection délivrant les tensions  $u_{A1A2}(t)$ ,  $u_{B1B2}(t)$  et  $u_{C1C2}(t)$  (figure C5).

Ce transformateur délivre des tensions qui compensent les composantes à 175 Hz présentes sur le réseau HTA, de telle sorte que l'installation de cogénération ne soit soumise qu'aux composantes sinusoïdales de fréquence 50 Hz.

L'onduleur est alimenté par une tension continue, notée  $U_0$ , obtenue par redressement et filtrage des tensions triphasées du réseau. Les signaux de commande appliqués aux grilles des transistors IGBT sont obtenus à partir des images filtrées des tensions du réseau.

- C2-1. Ecrire la relation liant les tensions  $v_{rés1}(t)$ ,  $u_{A1A2}(t)$  et  $v_{prod1}(t)$ .
- C2-2. Déterminer l'expression de  $u_{A1A2}(t)$  nécessaire pour que l'installation de production ne soit soumise qu'aux tensions sinusoïdales de fréquence 50 Hz.
- C2-3. Chaque interrupteur K de l'onduleur est constitué d'un transistor IGBT en parallèle avec une diode.
  - C2-3.1. Quelle précaution faut-il prendre lors de la commande des transistors IGBT d'un même bras (K1 et K2 par exemple) ?
  - C2-3.2. Expliquer brièvement le rôle de la diode dans chaque interrupteur.
- C2-4. Pour compenser les tensions  $v_{175Hz}$  présentes sur chaque phase, l'onduleur délivre entre les points S1, S2 et S3 des tensions  $u_{S12}(t)$ ,  $u_{S23}(t)$  et  $u_{S31}(t)$  dont la figure C6 présente une séquence (document réponse n°3). Ces tensions  $u_{S12}(t)$ ,  $u_{S23}(t)$  et  $u_{S31}(t)$  permettent, après des transformations non étudiées dans ce sujet, d'élaborer les tensions souhaitées en sortie du transformateur d'injection en  $A_1A_2$ ,  $B_1B_2$  et  $C_1C_2$ .

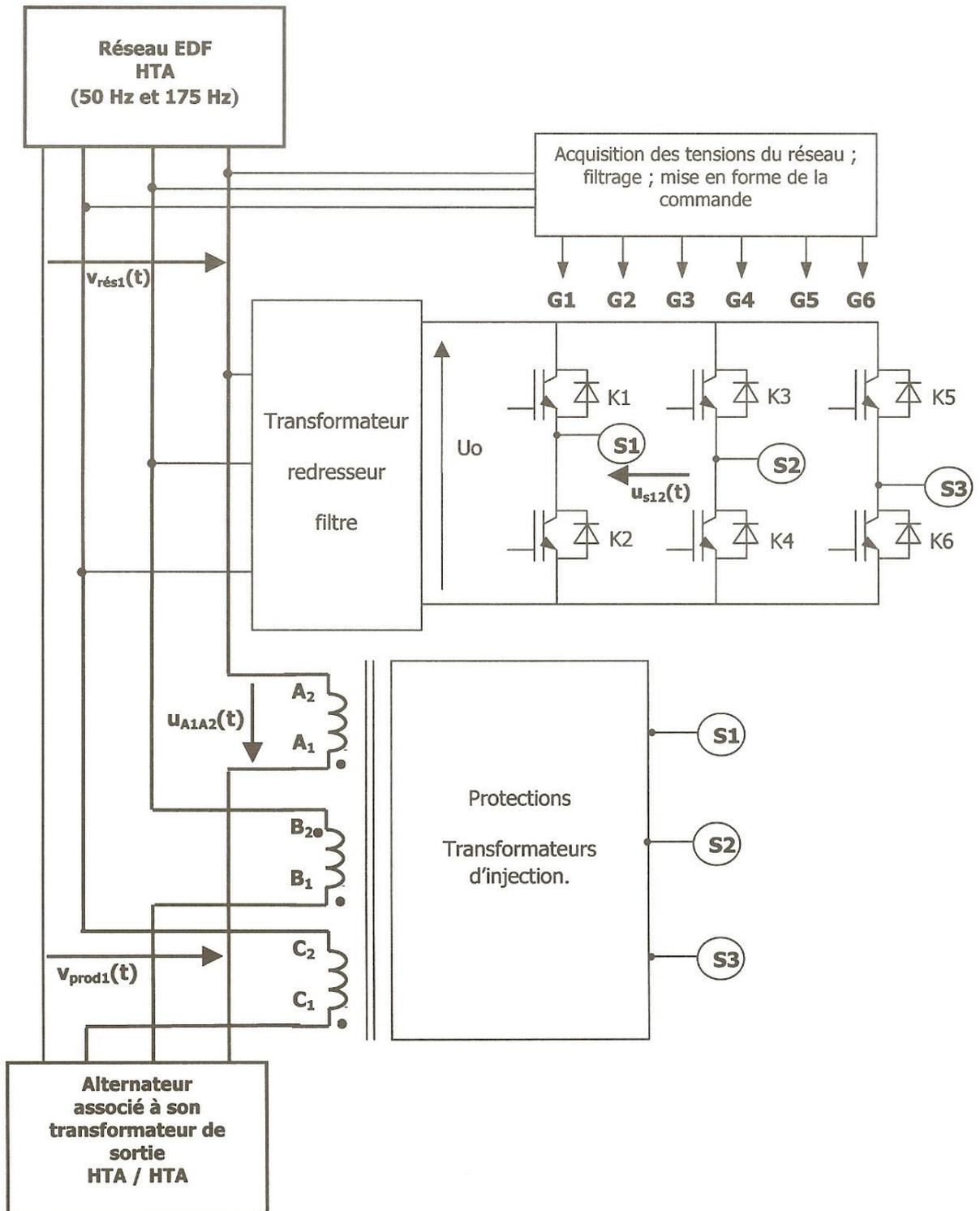
La production de la tension  $u_{S12}(t)$  met en jeu les interrupteurs K1, K2, K3 et K4.

- C2-4.1. Préciser l'état de ces interrupteurs lorsque  $u_{S12}$  prend la valeur  $+U_0$ .
- C2-4.2. Préciser l'état de ces interrupteurs lorsque  $u_{S12}$  prend la valeur  $-U_0$ .
- C2-4.3. Donner les deux possibilités permettant d'avoir  $u_{S12}$  nulle.

Les figures C6, C7 et C8 respectent la concordance des temps.

- C2-4.4. Hachurer sur la figure C7 (document réponse n°3) les séquences de conduction des interrupteurs, lorsqu'ils sont passants, pour les valeurs  $+U_0$  et  $-U_0$  de  $u_{S12}(t)$ .
- C2-4.5. En utilisant la démarche précédente, hachurer sur la figure C8 les séquences de conduction pour les valeurs  $+U_0$  et  $-U_0$  de  $u_{S23}(t)$  et  $u_{S31}(t)$ .  
Compléter la figure C8 avec les séquences de la figure C7.

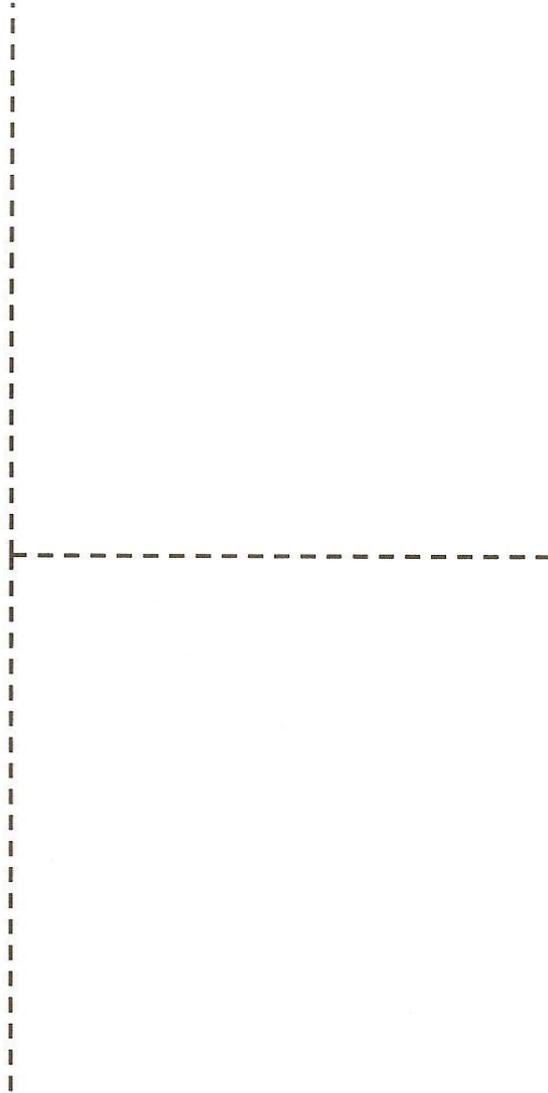
figure C5



**Document réponse n°1**

**à remettre avec la copie**

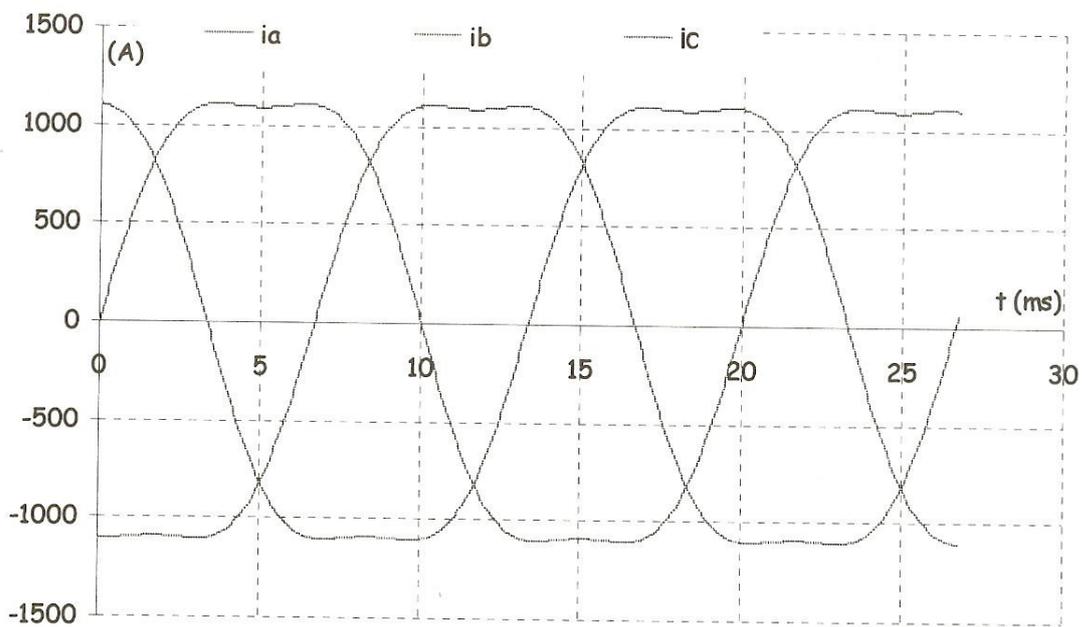
**figure A3** Diagramme vectoriel à puissance nominale  $P_n$   
(échelle 1000 V/cm)



**Document réponse n°2**

*à remettre avec la copie*

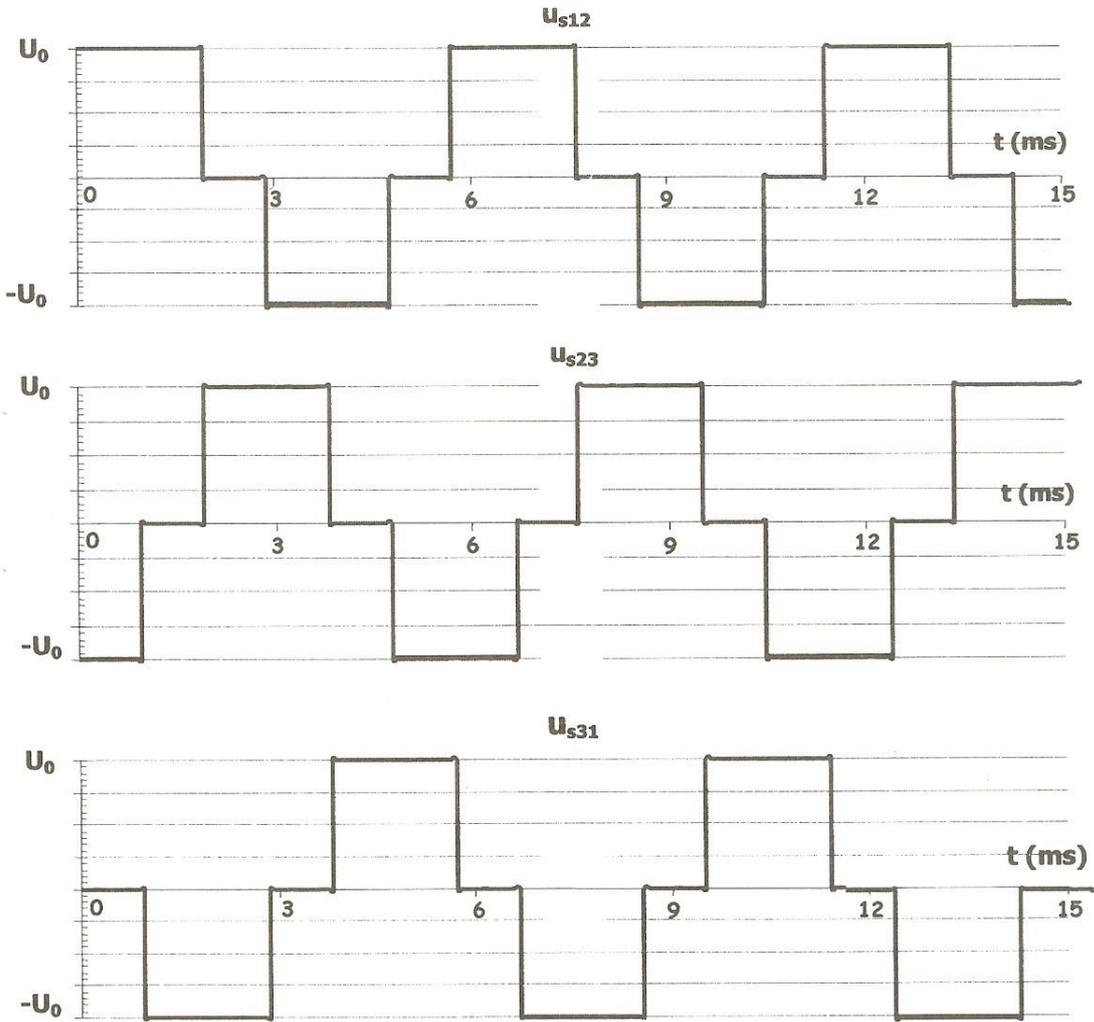
**figure B3**



**Document réponse n°3**

*à remettre avec la copie*

**figure C6**



**figure C7**

K1									
K2									
K3									
K4									

**figure C8**

K1									
K2									
K3									
K4									
K5									
K6									