

PROBLEME 2

Le sujet aborde quelques aspects du transport de l'énergie électrique dans les réseaux Haute Tension.

Après avoir mis en évidence les principes d'échange d'énergie dans un réseau et après avoir précisé les limites des lignes de transport, nous étudierons divers dispositifs de réglage du transfert de l'énergie électrique. Il s'agit de convertisseurs statiques commandés, appelés FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Le sujet comporte 5 parties :

- I. Puissance transportée par une ligne triphasée. Limites
- II. FACTS de type parallèle
- III. FACTS de type série
- IV. FACTS hybride ou UPFC (Unified Power Flow Controller)
- V. Exemple de structure : FACTS de type parallèle

Le réseau étudié relie par une ligne triphasée deux régions A et B, sous une tension composée de 400kV (Figure n°1).

Dans tout le problème, on supposera que la ligne est équilibrée et que les grandeurs sont sinusoïdales. On travaillera donc sur le schéma monophasé équivalent (Figure n°2) faisant intervenir les tensions simples et les courants en ligne et on utilisera les outils habituels des régimes sinusoïdaux : la représentation de Fresnel et la notation complexe.

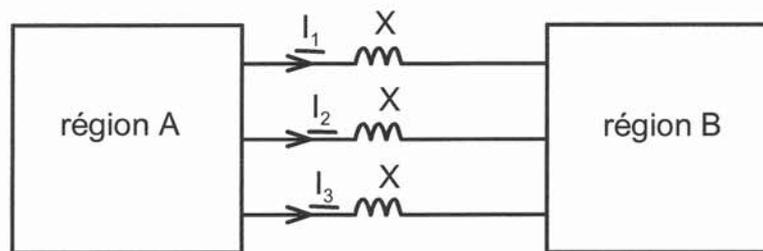


Figure n°1 : Modèle de la ligne de transport triphasée entre deux régions A et B

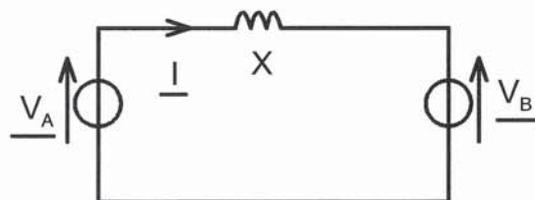


Figure n°2 : Schéma monophasé équivalent

\underline{V}_A et \underline{V}_B sont les grandeurs complexes associées aux tensions simples des régions A et B

$X = L\omega$ est l'impédance de la ligne

φ_A est le déphasage de \underline{I} par rapport à \underline{V}_A

φ_B est le déphasage de \underline{I} par rapport à \underline{V}_B

θ est le déphasage de \underline{V}_B par rapport à \underline{V}_A

V_A , V_B et I sont les valeurs efficaces des grandeurs sinusoïdales associées aux grandeurs complexes \underline{V}_A , \underline{V}_B et \underline{I} .

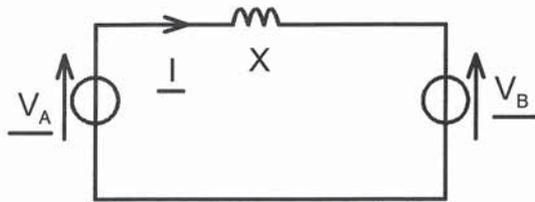
Remarques importantes :

Les expressions des puissances actives et réactives seront établies et calculées pour les 3 phases du réseau.

Il n'est pas nécessaire de tracer les différents diagrammes de Fresnel à l'échelle. Il suffit de tracer l'allure en respectant les vecteurs en phase, en quadrature, les signes des déphasages. Ces diagrammes serviront de support à l'établissement des relations demandées ou aux calculs.

I. Puissance transportée par une ligne triphasée . Limites

Le schéma monophasé équivalent à une ligne de transport triphasée entre deux régions A et B est le suivant :



I.1. Puissances actives et réactives

- I.1.1. Exprimer la puissance active P_A fournie par la région A en fonction de V_A , I et φ_A .
- I.1.2. Exprimer la puissance active P_B reçue par la région B en fonction de V_B , I et φ_B .
- I.1.3. Quelle relation peut-on écrire entre P_A et P_B ?
- I.1.4. Exprimer la puissance réactive Q_A fournie par la région A en fonction de V_A , I et φ_A .
- I.1.5. Exprimer la puissance réactive Q_B reçue par la région B en fonction de V_B , I et φ_B .
- I.1.6. Exprimer la puissance réactive Q_L consommée par la ligne de transport triphasée.
- I.1.7. Quelle relation peut-on écrire entre Q_A , Q_B et Q_L ?
- I.1.8. A partir des conventions choisies sur le schéma, préciser la signification (reçue ou fournie) du signe des puissances P_A , P_B , Q_A et Q_B .

I.2. Diagramme de Fresnel dans le cas général $V_A \neq V_B$

- I.2.1. Ecrire la relation entre \underline{V}_A , \underline{V}_B , X et \underline{I} .
- I.2.2. Tracer l'allure du diagramme de Fresnel en prenant \overline{V}_B comme origine des phases et dans le cas \overline{V}_A où est en avance sur \overline{V}_B ($\theta > 0$). On fera figurer sur ce diagramme les angles φ_A , φ_B et θ .
- I.2.3. Etablir, en utilisant le diagramme de Fresnel, l'expression de la puissance active P_B en fonction de V_A , V_B , X et θ .
- I.2.4. Quelle relation doit vérifier θ pour que la puissance active circule de la région A vers la région B ?

I.2.5. Pour quelle valeur de θ la puissance active P_A transmise est-elle maximale (puissance maximale théorique)?

I.3. Diagramme de Fresnel dans le cas particulier $V_A = V_B$

I.3.1. Tracer l'allure du diagramme de Fresnel en prenant $\overline{V_B}$ comme origine des phases et dans le cas où $\overline{V_A}$ est en avance sur $\overline{V_B}$ ($\theta > 0$).

I.3.2. Préciser la relation particulière qui existe entre φ_A et φ_B dans ce cas.

I.3.3. Exprimer également φ_A et φ_B en fonction de θ .

I.3.4. Etablir l'expression de la puissance active P_A en fonction de V_A , X et θ .

I.3.5. Etablir l'expression de la valeur efficace de l'intensité du courant I en fonction de V_A , X et θ .

I.3.6. Tracer l'allure des caractéristiques $P_A(\theta)$ et $I(\theta)$ pour $-\pi/2 < \theta < \pi/2$.
Noter sur ces caractéristiques les expressions des maximums de P_A et I .

I.3.7. Application numérique : $V_A = V_B = 231\text{kV}$. $X = 130\Omega$.

I.3.7.1. Calculer la puissance active maximale théorique, notée P_{Mth} que peut transporter la ligne.

I.3.7.2. En déduire la valeur efficace de l'intensité du courant I transitant dans chaque fil de ligne.

I.3.7.3. Calculer les puissances réactives Q_A , Q_B et Q_L .

I.3.7.4. Commenter le signe de ces puissances réactives.

I.3.7.5. Préciser la valeur des facteurs de puissance f_{pA} et f_{pB} au niveau de chaque région.

I.3.7.6. Commenter ces valeurs de facteur de puissance et analyser la conséquence sur le dimensionnement de la ligne de transport triphasée.

I.3.8. Limite thermique

En réalité, l'intensité du courant en ligne ne peut pas dépasser la valeur efficace nominale $I_{nom} = 1450\text{A}$.

I.3.8.1. Préciser les valeurs numériques de θ et de la puissance active nominale, notée P_{nom} , que peut transporter la ligne.

I.3.8.2. Quelle conséquence la limite thermique impose-t-elle ?

I.3.8.3. Calculer les puissances réactives Q_A , Q_B et Q_L .

I.3.8.4. Préciser la valeur des facteurs de puissance f_{pA} et f_{pB} au niveau de chaque région.

I.3.9. Limite de stabilité

En pratique, l'angle θ ne peut pas dépasser pas une valeur limite θ_{max} .

Cette dernière est incontournable afin de ne pas compromettre la stabilité du réseau

Dans la suite de ce problème, l'angle θ ne dépassera pas $\theta_{max} = 18^\circ$.

I.3.9.1. Calculer la valeur de la puissance active P_A fournie par la région A à la région B lorsque $\theta = 18^\circ$.

I.3.9.2. Préciser, dans ce cas, la valeur efficace I de l'intensité du courant.

I.3.9.3. Quelle conséquence la limite de stabilité impose-t-elle ?

I.3.9.4. Calculer les valeurs de puissances réactives Q_A , Q_B et Q_L .

I.3.9.5 . Préciser la valeur des facteurs de puissance f_{pA} et f_{pB} au niveau de chaque région.

I.3.9.6 . Conclure en comparant les performances obtenues dans ce cas par rapport aux valeurs maximale théorique et nominale de puissance active.

Afin d'améliorer les capacités de transport de la ligne sans compromettre la stabilité du réseau ni dépasser la limite thermique, nous allons étudier successivement 3 types de FACTS. L'objectif final est de transporter une puissance de 900MW, de contrôler éventuellement la tension en ligne à +/- 5% et d'améliorer le facteur de puissance au niveau de chaque région.

II. FACTS de type parallèle

Le FACTS de type parallèle est placé au milieu de la ligne de transport (Figure n°3). Il se comporte comme une charge purement capacitive de sorte que le courant \underline{I}_C est toujours en avance de $\pi/2$ sur la tension \underline{V}_C .

Le schéma monophasé équivalent à la ligne est alors le suivant :

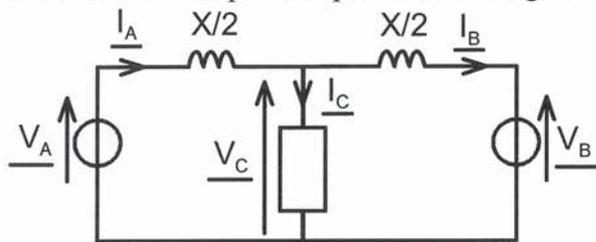


Figure n°3

On note θ_1 le déphasage de \underline{V}_C par rapport à \underline{V}_A et θ_2 le déphasage de \underline{V}_B par rapport à \underline{V}_C . On pourra utiliser les relations générales de la partie 1.3.

II.1 Relations générales

II.1.1 Donner l'expression de la puissance active P_A en fonction de V_A , V_C , $X/2$ et θ_1 .

II.1.2 Donner l'expression de la puissance active P_B en fonction de V_B , V_C , $X/2$ et θ_2 .

II.1.3 Quelle relation peut-on écrire entre θ_1 et θ_2 sachant que $V_A = V_B$?

II.1.4 En déduire les expressions de θ_1 et θ_2 en fonction de θ ?

II.1.5 Tracer l'allure de la caractéristique $P_A(\theta)$ pour $-\pi/2 < \theta < \pi/2$.

Noter sur cette caractéristique l'expression du maximum de P_A .

II.2 On commande le FACTS de telle sorte que $V_C = V_A = V_B$

II.2.1 Donner l'expression de la puissance active transmise par la ligne en fonction de V_A , X et θ ?

II.2.2 Comparer à l'expression de la puissance P_A calculée sans FACTS à la question 1.3.4.

II.2.3 En prenant \overline{V}_B comme origine des phases, tracer le diagramme de Fresnel faisant intervenir les grandeurs électriques complexes \underline{V}_A , \underline{V}_C , $j\frac{X}{2}\underline{I}_A$ et $j\frac{X}{2}\underline{I}_B$.

II.2.4 En déduire les grandeurs \overline{I}_A et \overline{I}_B et préciser la valeur des déphasages φ_A et φ_B .

II.2.5 Tracer \overline{I}_C sur le diagramme de Fresnel.

II.2.6 Donner l'expression de l'intensité efficace du courant I_A en fonction de V_A , $X/2$ et θ_1 .

II.2.7 Application numérique : $V_C = V_A = V_B = 231 \text{ kV}$ $\theta = 18^\circ$ $X/2 = 65\Omega$.

II.2.7.1 Calculer la valeur de la puissance active P_A transportée par la ligne triphasée.

II.2.7.2 Calculer la valeur efficace I_A , I_B et I_C des intensités des courants.

II.2.7.3 Calculer les puissances réactives Q_A et Q_B .

II.2.7.4 Calculer la puissance réactive Q'_L consommée par l'ensemble ligne-FACTS.

II.2.7.5 Calculer les facteurs de puissance f_{pA} et f_{pB} au niveau de chaque région.

II.2.8 Quelle est la plus value apportée par cette commande de FACTS ?

II.3 $V_A = V_B$ et on commande le FACTS de telle sorte que I_B soit en phase avec V_B .

II.3.1 En prenant $\overline{V_B}$ comme origine des phases, tracer le diagramme de Fresnel faisant intervenir les grandeurs électriques complexes $\underline{V_A}$, $\underline{V_C}$, $j\frac{X}{2}I_A$ et $j\frac{X}{2}I_B$.

Préciser la valeur de ϕ_A .

II.3.2 Donner une expression littérale de la valeur efficace V_C en fonction de V_B et θ .

II.3.3 Donner l'expression de la puissance active transmise par la ligne en fonction de V_A , X et θ ?

II.3.4 Comparer à l'expression de la puissance P_A calculée sans FACTS à la question 1.3.4.

II.3.5 Application numérique : $V_A = V_B = 231 \text{ kV}$ $\theta = 18^\circ$ $X/2 = 65\Omega$.

II.3.5.1 Calculer la valeur de la puissance active P_A transmise par la ligne dans ce cas.

II.3.5.2 Calculer les valeurs efficaces I_A , I_B puis I_C des intensités des courants.

II.3.5.3 Calculer les puissances réactives Q_A et Q_B .

II.3.5.4 Calculer la puissance réactive Q'_L consommée par l'ensemble ligne-FACTS.

II.3.5.5 Calculer les facteurs de puissance f_{pA} et f_{pB} au niveau de chaque région.

II.3.6 Quelle est la plus value apportée par cette commande de FACTS ?

III. FACTS de type série

Le FACTS série est placé au milieu de la ligne (Figure n°4). Il se comporte comme une charge purement capacitive de sorte que la tension $\underline{V_s}$ est toujours en retard de $\pi/2$ sur le courant \underline{I} .

Le schéma monophasé équivalent est alors le suivant :

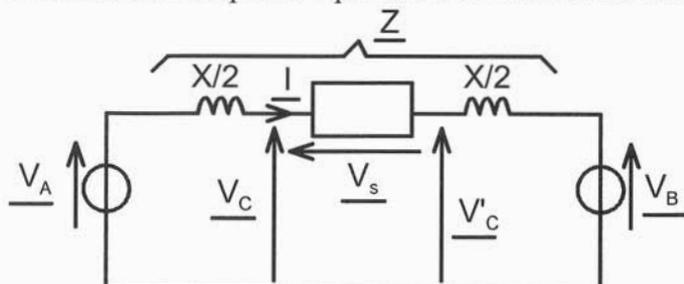


Figure n°4

On note Z l'impédance équivalente à la ligne et au FACTS.

On note Z_F l'impédance du FACTS.

$$V_A = V_B = 231\text{kV} ; \theta = 18^\circ.$$

- III.1 Exprimer la puissance active P_A transmise par le réseau A vers le réseau B en fonction de V_A , V_B , θ et Z .
- III.2 Calculer le module Z de l'impédance équivalente pour que $P_A = 900\text{MW}$.
- III.3 En déduire le module de l'impédance Z_F du FACTS.
- III.4 En prenant $\overline{V_B}$ comme origine des phases, tracer le diagramme de Fresnel faisant intervenir les grandeurs électriques complexes $\underline{V_A}$ et $\underline{Z} \cdot \underline{I}$.
- III.5 En déduire la direction de \vec{I} et la valeur des déphasages φ_A et φ_B .
- III.6 Calculer les valeurs efficaces I et V_S .
- III.7 Placer $\overline{V_C}$ sur le diagramme de Fresnel. Calculer la valeur efficace V_C .
- III.8 Préciser la valeur du déphasage θ_1 de $\underline{V_C}$ par rapport à $\underline{V_A}$.
- III.9 Calculer les puissances réactives Q_A et Q_B .
- III.10 Calculer la puissance réactive Q'_L consommée par l'ensemble ligne-FACTS.
- III.11 Calculer les facteurs de puissance f_{pA} et f_{pB} au niveau de chaque région.
- III.12 Comparer les performances obtenues avec un FACTS de type série par rapport à la ligne sans FACTS.

IV. FACTS hybride ou UPFC (Unified Power Flow Controler)

Le FACTS de type hybride est placé au milieu de la ligne (Figure n°5). Il comporte deux parties : une partie de type série ($\underline{V_S}$, $\underline{I_B}$) et une partie de type parallèle ($\underline{V_C}$, $\underline{I_C}$).

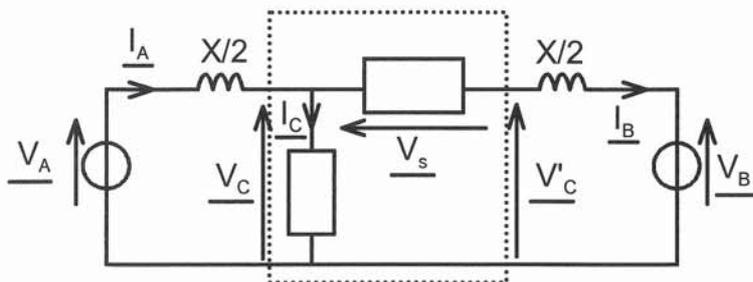


Figure n°5

Chaque partie (série ou parallèle) est commandée pour fournir ou consommer une puissance réactive. En ce qui concerne la puissance active, si la partie parallèle consomme une puissance P_C , cette puissance est fournie par la partie série (P_S) de sorte que globalement, le FACTS ne consomme pas de puissance active.

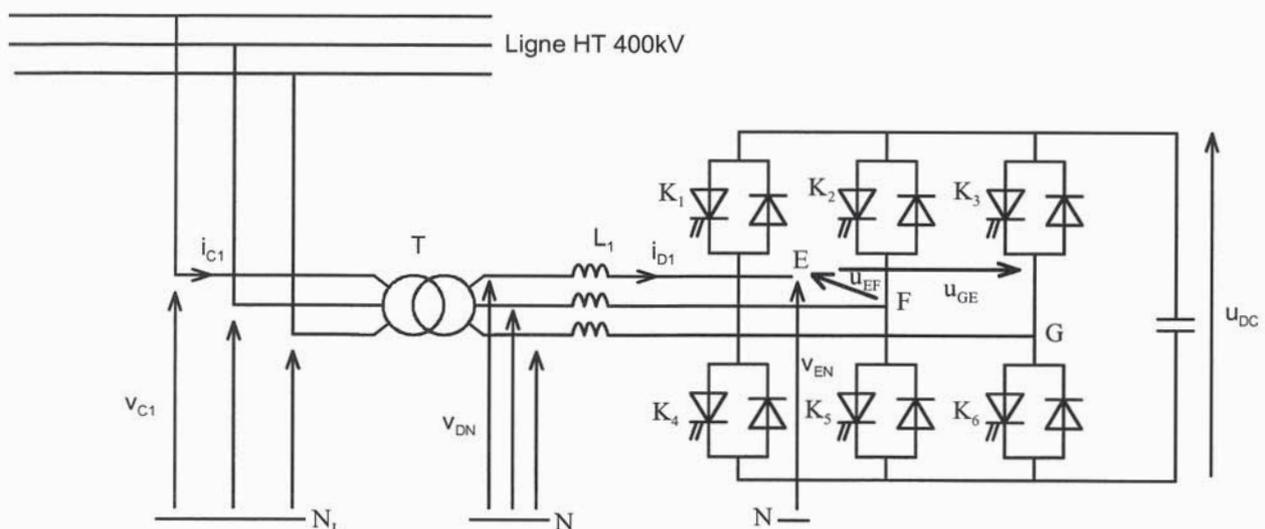
Pour chacune des deux parties du FACTS, on a pris la convention récepteur, on a donc $P_S = -P_C$.

$$V_A = V_B = V_C = 231\text{kV}. \theta = 18^\circ.$$

- IV.1** Exprimer la puissance active P_A fournie par la région A en fonction de V_A , V_C , $X/2$ et θ_1 , où θ_1 représente le déphasage de \underline{V}_C par rapport à \underline{V}_A .
- IV.2** Calculer θ_1 pour que $P_A = 900\text{MW}$.
- IV.3** Calculer la valeur efficace I_A . Cette valeur de I_A est-elle compatible avec les capacités thermiques de la ligne ?
- IV.4** En prenant \overline{V}_B comme origine des phases, tracer le diagramme de Fresnel faisant intervenir les grandeurs électriques complexes \underline{V}_A , \underline{V}_C et \underline{I}_A .
- IV.5** On souhaite que \underline{I}_B soit en phase avec \underline{V}_B .
- IV.5.1** Calculer la valeur efficace I_B .
- IV.5.2** Placer \overline{V}'_C puis \overline{V}_S sur le diagramme de Fresnel précédent.
- IV.5.3** Calculer les valeurs efficaces V'_C et V_S .
- IV.5.4** Préciser la valeur du déphasage de \underline{I}_B par rapport à \underline{V}_S .
- IV.5.5** Calculer la puissance active P_S reçue par la partie série du FACTS.
- IV.5.6** Calculer la puissance réactive Q_S consommée par la partie série du FACTS. Commenter le signe de Q_S .
- IV.5.7** Calculer la valeur efficace I_C . Préciser la valeur du déphasage de \underline{I}_C par rapport à \underline{V}_C .
- IV.5.8** Calculer la puissance active P_C reçue par la partie parallèle du FACTS. Comparer P_S et P_C .
- IV.5.9** Calculer la puissance réactive Q_C consommée par la partie parallèle du FACTS. Commenter le signe de Q_C .
- IV.6** Comparer avec les résultats obtenus sans FACTS puis avec les résultats obtenus avec les autre type de FACTS.

V. Exemple de structure : FACTS de type parallèle

Le FACTS de type parallèle est réalisé par un convertisseur statique dont le principe peut être décrit par le schéma suivant (structure STATCOM) :



N_L est le neutre de la ligne triphasée.

N est le neutre au secondaire du transformateur.

Le transformateur T est supposé parfait : tension composée primaire **400kV** ; tension composée secondaire **20kV**.

Les inductances L_1 placées au secondaire du transformateur ont une valeur telle que l'ondulation haute fréquence des courants les parcourant est faible. On donne **$L_1 = 0,41\text{mH}$** .

Les tensions v_{c1} et v_{DN} sont sinusoïdales de fréquence **$f = 50\text{Hz}$** .

Le courant i_{D1} et la tension v_{EN} sont non sinusoïdaux. On note i_{D11} et v_{EN1} leurs fondamentaux de fréquence 50Hz.

La commande MLI des interrupteurs est telle que le fondamental i_{D11} du courant i_{D1} est en avance de 90° sur la tension v_{DN} .

Le fonctionnement envisagé correspond à l'étude du **paragraphe 2.3**.

V.1 Ecrire la relation entre \underline{V}_{DN} , \underline{I}_{D11} , L_1 et \underline{V}_{EN1} .

V.2 En prenant $\overline{V_{D1}}$ comme origine des phases, tracer le diagramme de Fresnel faisant intervenir les grandeurs électriques complexes \underline{I}_{D11} et \underline{V}_{EN1} .

V.3 Calculer les valeurs efficaces V_{EN1} et I_{C1} sachant que $I_{D11} = 11,26\text{kA}$.

V.4 Le document-réponse 1 représente $v_{DN}(t)$, $i_{D1}(t)$ et $v_{EN}(t)$. Déduire des questions précédentes le tracé de $v_{EN1}(t)$. On précisera en particulier son amplitude et sa phase.

V.5 La valeur efficace V_{EN1} est liée à celle de U_{DC} par la relation $V_{EN1} = m \cdot \frac{U_{DC}}{2\sqrt{2}}$.

Calculer la valeur efficace U_{DC} pour $m = 0,8$.

V.6 Etablir l'expression instantanée de v_{EN} en fonction de u_{EF} et u_{FG} .

V.7 Le document-réponse 2 précise les commandes des semi-conducteurs K_1 à K_6 sur un intervalle de temps très inférieur à une période du réseau. Représenter les tensions instantanées $u_{EF}(t)$, $u_{FG}(t)$ et $v_{EN}(t)$.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : _____ Session : _____

Concours : _____

Spécialité/option : _____ Repère de l'épreuve : _____

Intitulé de l'épreuve : _____

NOM : _____

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

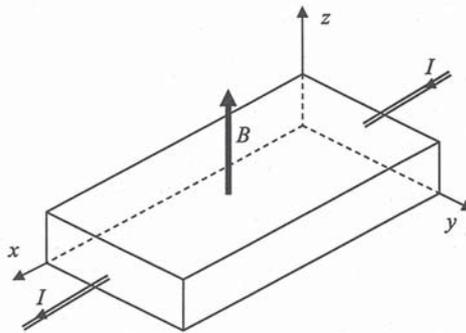
Prénoms : _____ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

EAE SPC 2

Document réponse

PROBLEME I



Document réponse n° 1 – Sonde à effet Hall

Couche	Nature	Matériaux	Moyen de réalisation
N			
P			
SiO2			
(c)			

Document réponse n° 2 – Sonde à effet Hall

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : _____ Session : _____

Concours : _____

Spécialité/option : _____ Repère de l'épreuve : _____

Intitulé de l'épreuve : _____

NOM : _____

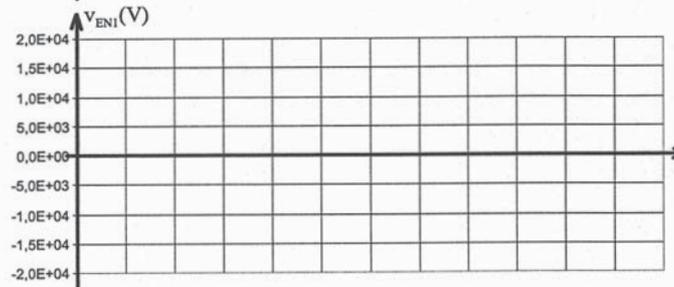
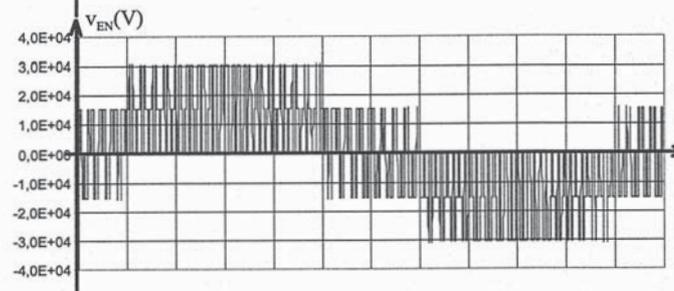
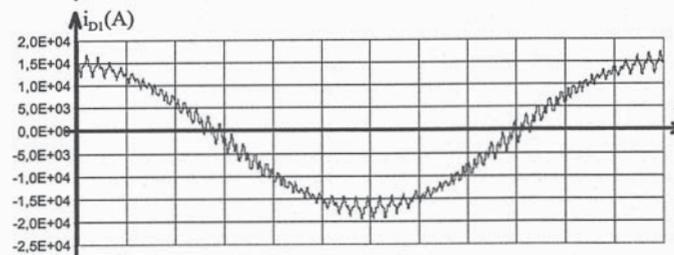
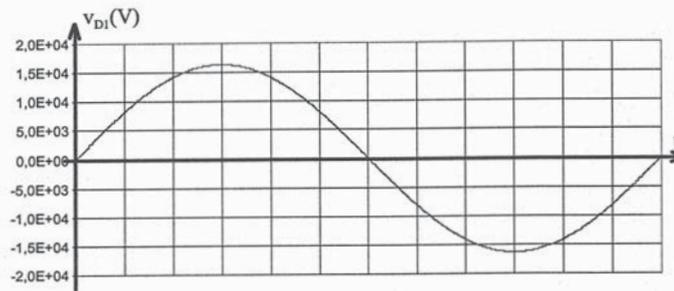
(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : _____ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

EAE SPC 2

PROBLEME II. Document réponse n°1



MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : _____ Session : _____

Concours : _____

Spécialité/option : _____ Repère de l'épreuve : _____

Intitulé de l'épreuve : _____

NOM : _____

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : _____ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

EAE SPC 2

PROBLEME II. Document réponse n°1

