ministère
Éducation
nationale

EAE GEE 1
Repère à reporter sur la copie

SESSION 2009

CONCOURS EXTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

COMPOSITION D'AUTOMATIQUE ET D'INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

Commandes d'un convertisseur multicellulaire série associé à une MCC.

Sommaire

PG Présentation Générale 2

PG.1 Tension Bloquée par cellule 2
PG.2 Courant commuté par une cellule 3
PG3 Relations décrivant le convertisseur 3

1ère Partie : Modélisation et analyse du multicellulaire 7

2ème Partie : Commandes classiques 10

3ème Partie : Commande par modes glissants d'ordre 1 13

4ème Partie : Commande d'ordre 2 et multicellulaire. 15

Document Réponse 17

Annexe 19

Avertissements :

Les quatre parties de cette composition sont indépendantes. Chaque partie devra être rédigée sur une (des) copie(s) séparée(s).
Inversement, le questionnement dans chaque partie est généralement progressif, il est donc recommandé, dans chaque partie, de traiter les questions dans l'ordre proposé.

Si au cours de l'épreuve, le candidat détecte ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale par écrit dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant précisément les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Présentation Générale

Depuis, ces vingt dernières années, l'électronique de puissance, l'informatique industrielle et l'automatique ont fait des progrès considérables. Dans cette épreuve, nous proposons un thème permettant d'en appréhender directement les effets dans au moins deux des domaines (l'automatique et l'électronique de puissance). Ceci n'a été rendu possible que par l'évolution rapide des trois domaines, fortement liés dans cette application. Dans un but de simplification, nous considérerons une structure simple constituée basée sur un hacheur multicellulaire commandant une MCC.

Mais qu'est-ce qu'un convertisseur multicellulaire série ? Et a-t-il un intérêt industriel ?

Répondons en premier lieu à la première question.

Topologie du convertisseur multicellulaire série

Thierry MEYNARD et Henri FOCH (LEEI-ENSEEIHT Toulouse) dans leurs Brevets n°91.09582 et 92.00652 donnent les principes d'un tel convertisseur. Un convertisseur multicellulaire série n'est pas la simple mise en série d'interrupteurs H_k, mais la mise en série de cellules de commutation $Cell_k$. La Figure PG. présente le convertisseur multicellulaire série dans sa version $n = 3$.

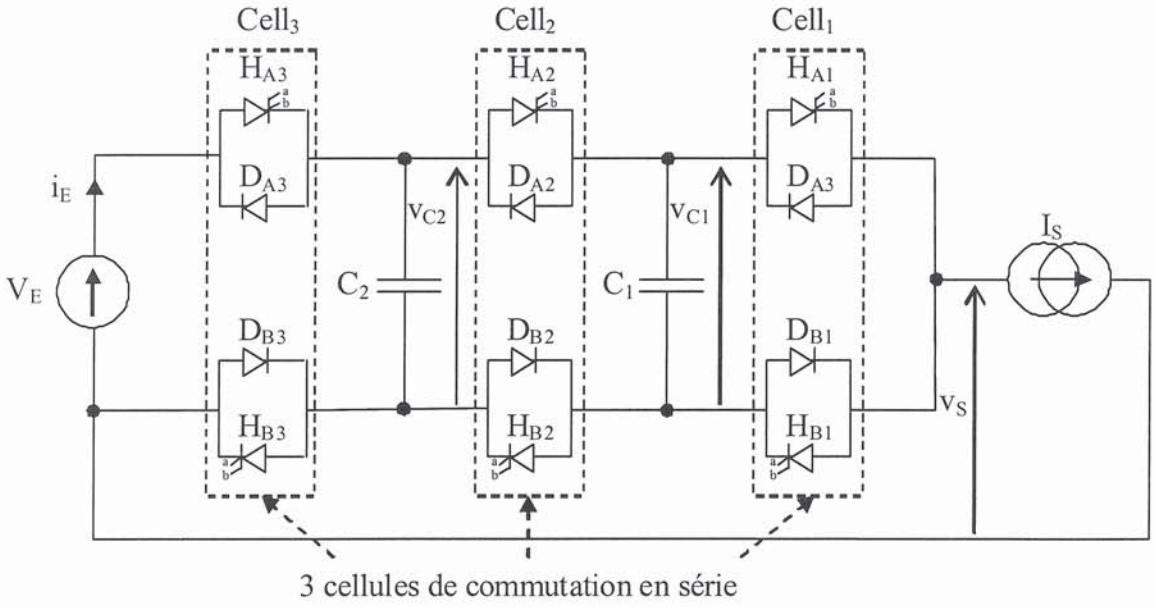

Figure PG. 1 : hacheur 2 quadrants utilisant trois cellules commandées en série

PG.1. Tension bloquée par une cellule

Chaque cellule ($Cell_k$, k = 1 à n) est encadrée par deux sources de tension intermédiaire v_{Ck} et v_{Ck-1}, avec $v_{C0} = 0$ et $v_{Cn} = V_E$. Dans cette présentation générale, nous supposons la valeur moyenne

des tensions v_{Ck} (v_{Ck}, k = 0 à n) parfaitement maîtrisée. La figure PG 2 isole une cellule quelconque dans son contexte immédiat et rappelle ses deux seules configurations stables.

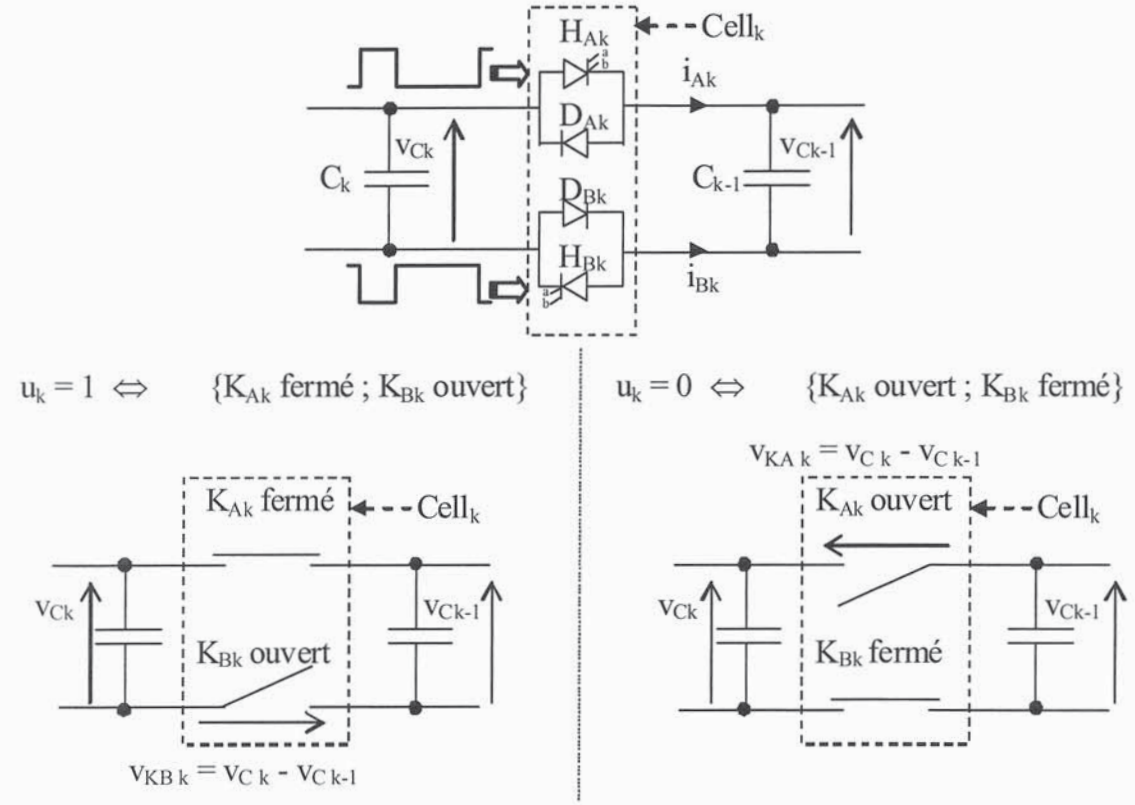

figure PG 2 : cellule $cell_k$ et ses deux configurations stables ($u_k = 0$ et $u_k = 1$)

On remarque en particulier que l'interrupteur bloqué doit tenir la tension v_{cellk}, telle que :

$v_{cellk} = v_{Ck} - v_{Ck-1}$

Dans le cadre de l'utilisation de $(2n)$ interrupteurs K_k de calibre identique, comme on le verra dans la réponse à la deuxième question, il faut obtenir la même contrainte en tension pour toutes les cellules. Soit :

$$v_{cellk} = \frac{V_E}{n}$$

D'où une répartition régulièrement étagée des tensions internes :

Nota : les condensateurs C_k sont pré-chargés à l'origine sous la tension $v_{Ck}=V_E/n$.

PG.2. Courant commuté par une cellule

Le courant i_S prélevé par la source de courant aval est une variable continue dans le temps (la charge est fortement inductive); quelles que soient les commutations des cellules, il doit pouvoir circuler. En l'occurrence, en partant de la source de courant i_S et en remontant vers la source de tension V_E, on constate que i_s est aiguillé par les différentes cellules, et, selon leur état, circule ou non à travers les condensateurs C_1 à C_n.

$i_{Ak} = u_k\, i_S$

$i_{Bk} = (1-u_k)\, i_S$

PG.3. Relations décrivant le convertisseur

La tension v_S appliquée à la source de courant i_S résulte du choix des *n* commandes u_k :

$$v_S = \sum_{k=1}^{n} v_{KB\,k} = \sum_{k=1}^{n} u_k\, v_{cell\,k}$$

Dans le cas particulier où les *n* tensions cellulaires sont identiques, on a :

$v_S = \frac{V_E}{n} \sum_{k=1}^{n} u_k$	(0.1)

L'évolution des tensions internes v_{Ck} (k = 1 à n-1) est donnée par la valeur du courant i_{Ck} de chaque condensateur C_k. Celui-ci est lui-même déterminé par la configuration de ses deux cellules adjacentes (cf. Figure PG. 3) :

$i_{Ck} = i_{Ak+1} - i_{Ak} = i_S\,(u_{k+1} - u_k)$	(0.2)
$v_{Ck} = v_{Ck}(0) + \int_0^t \frac{i_{Ck}}{C_k} dt$	(0.3)

La tension $v_{Ck}(t)$ n'évolue que lorsque les deux commandes de ses cellules adjacentes diffèrent. Et dans ce cas, elle évolue avec une dérivée proportionnelle, au signe près, au courant de charge i_S.

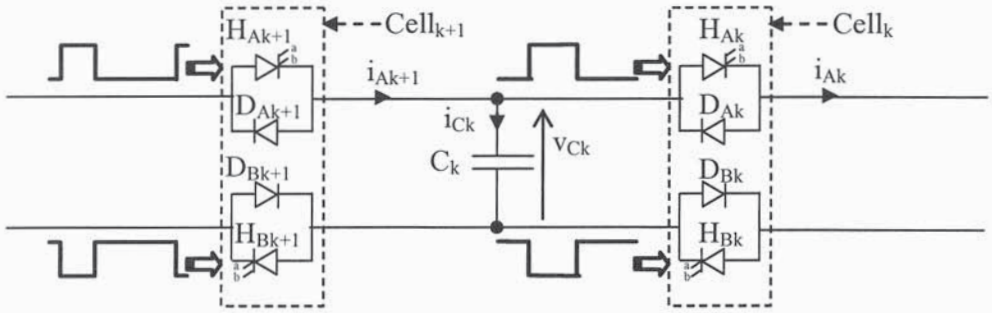

Figure PG. 3 : causes de l'évolution de la tension v_{Ck} aux bornes du condensateur C_k.

Après avoir succinctement étudié le principe du convertisseur multicellulaire série essayons de répondre à la deuxième question, A-t-il un intérêt industriel ?

Avantages et inconvénients du convertisseur multicellulaire série

Les convertisseurs multicellulaires sont déjà une réalité industrielle ; ce principe est actuellement exploité dans la chaine de traction d'une locomotive. Les photos ci-dessous sont issues d'une présentation à l'AVAMIP (www.**avamip**.fr/conference_25_01/**AVAMIP**shorter.ppt).

Tournez la page S.V.P.

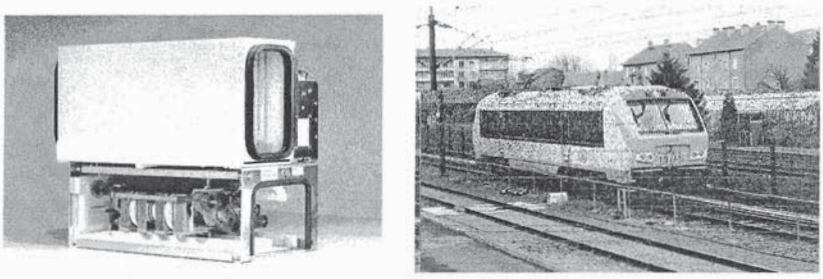

Figure PG.4 : module à GTO du hacheur d'entrée 1.5MW pour une locomotive de 6 MW utilisant 4 hacheurs multicellulaires.

Ceci est dû à leurs nombreux avantages :

- Minimisation du $\frac{\partial V_s}{\partial t}$,
- Fréquence de l'ondulation de tension de sortie multipliée par n et amplitude divisée par n, ce qui permet de diviser les valeurs des composants de filtrage en n^2,
- Modularité, avec une même unité de base (la cellule) on peut couvrir une large gamme de tensions d'alimentation en ajoutant le nombre de cellules nécessaires.

Une implantation industrielle plus importante du convertisseur multicellulaire série se heurte à son principal inconvénient, la complexité de sa commande. L'un des problèmes majeurs d'un tel système étant l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs (notamment en régime transitoire). C'est en partie ce que nous étudierons dans cette épreuve, pour ceci nous considérerons la maquette de laboratoire suivante :

Présentation de la maquette expérimentale

Comme l'indique la figure PG.5, le but ici sera simplement de commander en vitesse une machine à courant continu à excitation séparée, mais ici en utilisant comme hacheur, une structure multicellulaire quatre quadrants.

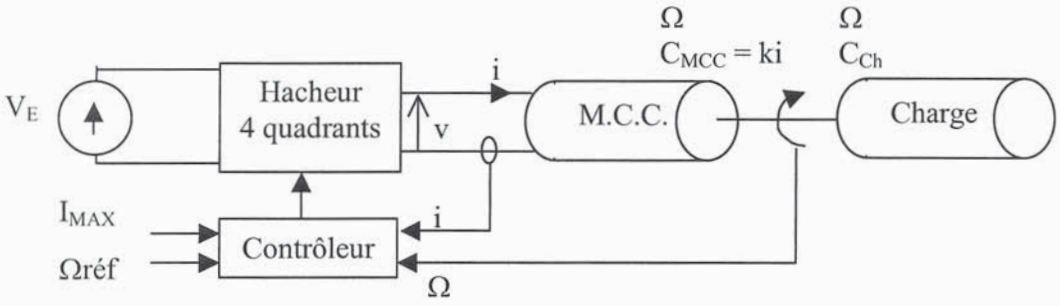

Figure PG.5 : maquette expérimentale

Le hacheur quatre quadrants est constitué comme représenté à la figure PG.6.

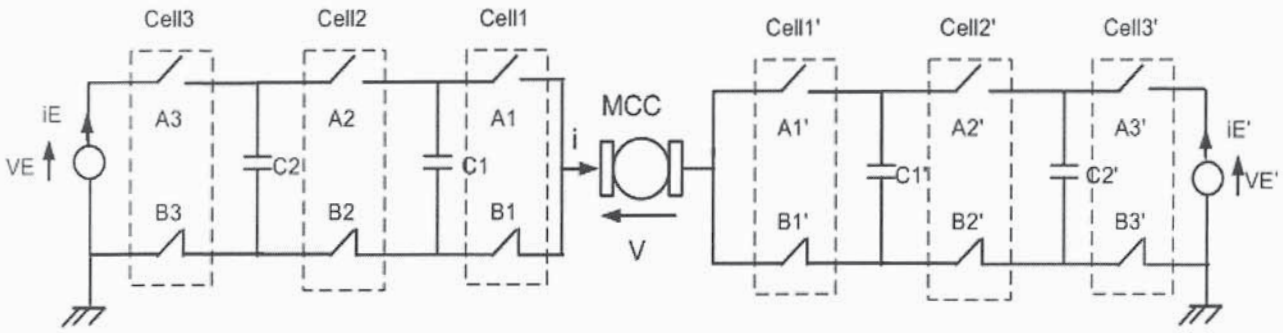

Figure PG.6 : structure du hacheur multicellulaire

Dans toutes les parties de cette épreuve (à l'exception de la fin de la partie 4) les commutations seront considérées comme instantanées et parfaites.

Tournez la page S.V.P.

1ère Partie : Modélisation et Analyse du hacheur multicellulaire

Afin de simplifier l'étude, dans cette partie nous ne considérerons et ne modéliserons qu'un hacheur deux quadrants à 3 cellules sur charge R L (Figure 1.1)

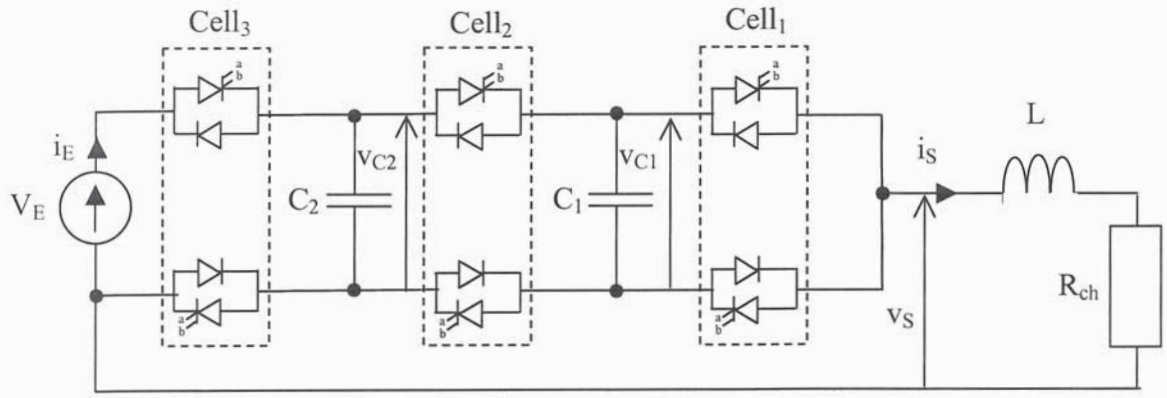

Figure 1.1 *: schéma de principe du hacheur tri-cellulaire*

Les cellules de commutation $Cell_i$ avec i allant de 1 à 3 sont caractérisées par u_i.

On a $u_i = 1$ lorsque l'interrupteur supérieur est fermé et l'inférieur ouvert. De même on a $u_i = 0$ lorsque l'interrupteur supérieur est ouvert et l'interrupteur inférieur fermé.

Le vecteur de commande des trois cellules est noté U et est défini comme suit :

$$U = (u_1, u_2, u_3)^T \tag{1.1}$$

Nota : $(.)^T$ *dénote la transposée d'un vecteur.*

Les valeurs numériques sont les suivantes :

Alimentation	Filtre interne	Charge	
V_E	C_i	L	R_{ch}
400 V	33 µF	5 mH	30 Ω

Donner les expressions de V_S en fonction de V_E, V_{C1} et V_{C2}

Q.1.1 pour $U = (1,1,1)^T$,

Q.1.2 pour $U = (0,0,0)^T$,

Q.1.3 pour $U = (1,0,1)^T$.

Q.1.4 Donner l'expression de V_S en fonction de V_E, V_{C1}, V_{C2}, u_1, u_2 et u_3 pour $U=(u_1,u_2,u_3)^T$.

Q.1.5 Donner l'équation différentielle de la tension aux bornes de chaque condensateur en fonction de i_s et $U=(u_1,u_2,u_3)^T$.

Q.1.6 Donner l'équation différentielle de i_s en fonction de V_S, R_{ch} et L.

Hypothèse 1 : *Le hacheur multicellulaire est équilibré* $V_{C1}=\frac{V_E}{3}$ *et* $V_{C2}=\frac{2V_E}{3}$ *(valeur nominale des tensions aux bornes des condensateurs) et* i_s *est constant.*

Q.1.7 Sous l'hypothèse 1 quelle est la condition sur le cycle $\underline{U}=(U_1,U_2,..,U_k)$ pour que les condensateurs restent proches de leur valeur nominale en régime établi (répétition du cycle) ?

Sous l'hypothèse 1, le système est contrôlé à l'aide de la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) décalée suivante (figure 1.2).

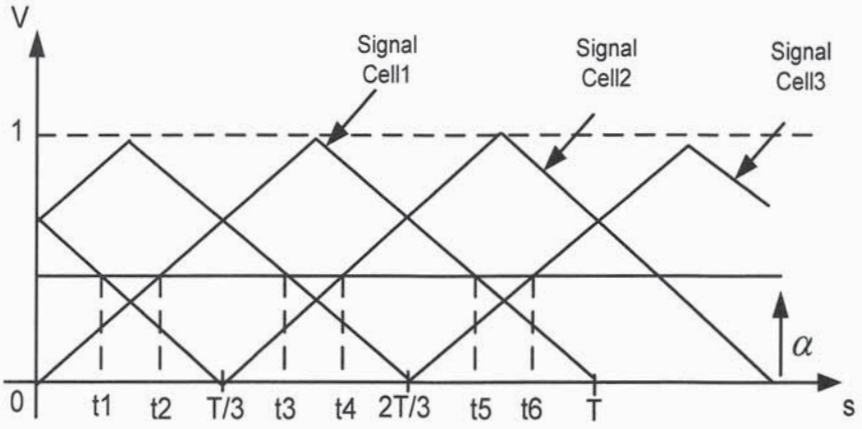

Figure 1.2 : *définition des ordres de commandes MLI*

Nota : *Pour des raisons technologiques, notamment la contrainte d'un temps minimal entre l'ouverture et la fermeture d'une cellule* α *est compris entre 0.01 et 0.99 et les cellules sont à l'état 1 si leur signal respectif (Signal* $Cell_i$*) a une tension supérieure à la tension de consigne* α.

Q.1.8 Démontrer que la condition trouvée à la question Q.1.7 est vérifiée pour la commande MLI décalée de la figure 1.2.

Q.1.9 Sous l'hypothèse 1, calculer la valeur moyenne de V_S sur un cycle en fonction de α.

Q.1.10 La charge a les valeurs suivantes $R_{ch}=30\Omega$ et $L=5mH$. Sous l'hypothèse 1 calculer la valeur moyenne de i_s.

Q.1.11 Calculer l'amplitude du fondamental de l'ondulation de i_s pour une période du cycle de la figure 1.2 de $50\mu s$ et pour $\alpha = 0{,}5$. Cette amplitude est-elle inférieure à 1% de la valeur moyenne $<i_s>$?

Nota : *L'amplitude du fondamental d'un signal carré d'amplitude crête à crête de 2 est de* $\frac{4}{\pi}$.

Les dernières questions de cette partie de modélisation sont consacrées à l'obtention d'un modèle instantané par espace d'état du hacheur multicellulaire et de sa charge et ceci sans hypothèse simplificatrice autre que celle de commutations instantanées et parfaites des cellules.

Q1.12 Donner la représentation d'état instantanée $\overset{o}{x}$, de l'ensemble convertisseur multicellulaire plus charge en choisissant comme vecteur d'état $x := (x_1, x_2, x_3)^T = (V_{C1}, V_{C2}, i_S)^T$, comme vecteur d'entrée $U = (u_1, u_2, u_3)^T$ et comme vecteur de sortie (grandeur mesurée) $y = x_3 = i_s$.

Nota : $\overset{o}{x}$ *représente la dérivée par rapport au temps du vecteur* x.

Q.1.13 Cette représentation d'état est-elle linéaire ?

Q.1.14 Pour $U = U_a = (1,0,0)^T$ le système est-il observable ?

Q.1.15 Pour $U = U_b = (0,0,1)^T$ le système est-il observable ?

Q.1.16 Une séquence de commande composée de U_a et U_b contient elle suffisamment d'informations pour permettre d'observer les tensions aux bornes des capacités ? Justifier votre réponse.