



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION  
NATIONALE

EAE SIE 3

SESSION 2019

## AGREGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR  
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,  
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION

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.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.**

Tournez la page S.V.P.

A

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	103	1268

## Projet SMART ZAE : gestion intelligente de l'énergie d'une Zone d'Activité Economique



Photo Yorrick Cannet

Les réseaux électriques actuels reposent sur 4 segments clairement identifiés : la production de l'énergie, le transport, la distribution et la consommation. L'augmentation des besoins en énergie, les contraintes environnementales et les impacts économiques entraînent un changement de paradigme énergétique. Celui-ci doit nécessairement être moins énergivore, plus respectueux de l'environnement mais aussi plus efficient. Les réseaux électriques connaissent aujourd'hui une forte évolution induite par la libéralisation des marchés, la multiplicité des sources énergétiques et l'introduction des systèmes intelligents pour la conduite et l'optimisation des installations.

Ces réseaux doivent aujourd'hui apporter de nouvelles solutions à plusieurs niveaux :

- une production décentralisée liée à la multiplicité des sources en lien avec de nouveaux usages ;
- la recherche de nouveaux outils de pilotage et de planification afin de réaliser l'adéquation entre les besoins et la production d'énergie ;
- la protection des personnes et des matériels.

Ils doivent de surcroît intégrer de l'intelligence embarquée et déportée ainsi que des moyens de communication fiables et sécurisés, le tout étant articulé avec le réseau d'énergie. Ces nouveaux réseaux énergétiques, plus flexibles, plus réactifs et moins carbonés devront être capables d'assurer le dialogue permanent entre sources délocalisées de production d'énergie renouvelable, postes de consommation énergétique et systèmes de stockage décentralisés. Pour cela, les innovations dans les technologies des automatismes, du numérique et du pilotage des systèmes énergétiques convergent pour permettre la mise en œuvre de réseaux électriques intelligents. Ceux-ci plus connus sous le nom de « Smart Grid » permettent de répondre aux enjeux auxquels nous faisons aujourd'hui face :

- le réchauffement climatique ;
- la saturation et la fragilité des réseaux électriques péninsulaires ;
- la gestion des pointes de consommation ;
- la gestion des nouveaux usages de l'énergie tels que le véhicule électrique ;

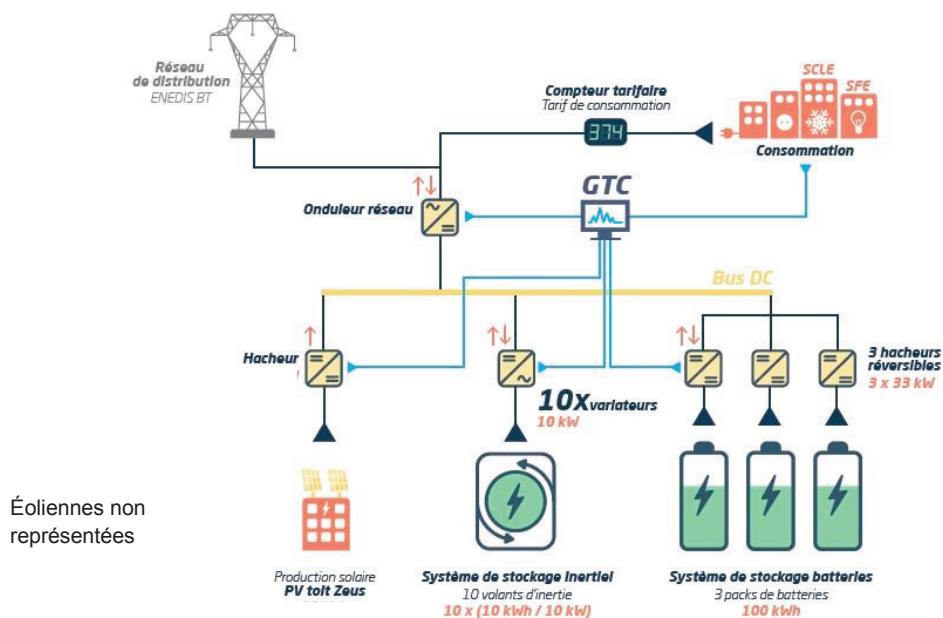
- la croissance des technologies de l'information ;
- les enjeux géopolitiques liés à l'énergie ;
- la compétitivité des organisations.

Le support d'étude retenu pour ce sujet est le site de l'entreprise SCLE-SFE qui héberge le projet **Smart ZAE (Zone d'Activité Economique intelligente)** à Toulouse. Celui-ci vise à expérimenter des technologies permettant à une zone d'activité économique de piloter et réduire sa consommation d'énergie notamment grâce au stockage de l'énergie produite sur le site. Plusieurs objectifs ont été poursuivis :

- prévoir, suivre et optimiser l'utilisation de la production locale d'énergie d'origines renouvelables par distribution de l'intelligence sur les différents niveaux ;
- maîtriser les consommations et limiter les appels de puissance ;
- valoriser économiquement la flexibilité apportée par le pilotage des installations (rapport consommation/production) et le stockage de l'énergie ;
- contribuer à l'équilibre du réseau en cas de nécessité en développant le concept de réseau « auto-cicatrisant ».

Le réseau d'énergie étudié inclut :

- une connexion au réseau de distribution électrique ;
- 170 kW crête de panneaux photovoltaïques ;
- 15 kW pic d'éoliennes ;
- 100 kWh de stockage à partir de volants d'inertie ;
- 100 kWh de stockage à partir de batteries Lithium-ion ;
- un bus d'énergie à courant continu ;
- une gestion centralisée permettant le pilotage et le suivi de la consommation énergétique.



**Ce sujet porte sur l'étude des technologies mobilisées et des stratégies de pilotage de l'énergie qui ont été développées dans le cadre du projet SMART ZAE.**

**Partie A : étude énergétique de l'infrastructure globale du site**

**Partie B : étude du stockage inertiel de l'énergie**

**Partie C : étude de l'onduleur alimentant les volants d'inertie**

## Partie A : étude énergétique de l'infrastructure globale du site

**L'objectif de cette partie est d'étudier les stratégies de pilotage de l'énergie mises en œuvre sur le site.**

L'étude n'inclut pas le coût initial de l'installation. Dans l'ensemble de l'étude on néglige la production d'électricité issue des éoliennes. On note  $\eta_{PV}$  le rendement des panneaux photovoltaïques et  $S_{PV}$  la surface de panneaux photovoltaïques installée. L'installation est composée de 708 panneaux photovoltaïques de dimension 1,64 m x 0,99 m. On a  $\eta_{PV} = 14,8\%$ . L'influence de la température sur le rendement des panneaux photovoltaïques est négligée. On néglige également l'influence du rayonnement réfléchi et de la propreté des surfaces. Les panneaux photovoltaïques sont orientés plein sud et inclinés par rapport à l'horizontale d'un angle  $\alpha_i = 15^\circ$ .

**Q1.** Les données de gisement solaire donnent une irradiation solaire globale annuelle  $IGP = 1\,459\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$  sur un plan se trouvant dans les mêmes conditions de lieu, d'orientation et d'inclinaison que l'installation photovoltaïque étudiée.

*Déterminer  $W_{PVa}$  l'énergie produite annuellement par l'ensemble des panneaux photovoltaïques.*

**Q2.** Les profils moyens de consommation énergétique du site pour un jour de semaine et un jour de week-end sont fournis sur le document ressource DR1. On fait l'hypothèse que l'intégralité de la production photovoltaïque est utilisée en autoconsommation.

*Déterminer la part de la consommation électrique annuelle du site qui peut être autoproduite par les panneaux photovoltaïques.*

**Q3.** Afin de permettre une autoconsommation de l'énergie produite à l'aide des panneaux photovoltaïques il est nécessaire de doter le site d'éléments de stockage en cas de production photovoltaïque excédentaire notamment pendant les week-ends de la phase estivale. On néglige les pertes liées aux transferts énergétiques.

*Compléter les graphiques du document réponse DRP1 permettant d'établir l'allure de l'énergie stockée et de la consommation énergétique du point de vue du réseau ENEDIS pour une journée de week-end estival.*

**Q4.** À l'aide des graphiques établis précédemment, analyser l'intérêt de disposer d'éléments de stockage sur le site.

En cas de tarification Heures Creuses/Heures Pleines, les systèmes de stockage permettent également d'emmagasiner de l'énergie achetée à moindre coût qui sera ensuite utilisée pendant la plage horaire à plus fort coût. On note  $A_D$  le facteur d'autodécharge horaire de l'ensemble des dispositifs de stockage et  $\eta_S$  le rendement du transfert énergétique entre les dispositifs de stockage et le réseau électrique du site. Le rendement  $\eta_S$  est supposé identique pendant le stockage et le déstockage. On note  $t$  le temps écoulé entre l'instant de début de la plage horaire d'heures pleines et l'instant de réinjection de l'énergie stockée dans le réseau électrique du site.

**Q5.** Pour une quantité d'énergie  $E_0$  emmagasinée dans les éléments de stockage à  $t=0$ , déterminer l'expression de la quantité d'énergie  $E(t)$  susceptible d'être réinjectée sur le réseau électrique du site à l'instant  $t$ .

**Q6.** On note  $P_{HP}$  le prix du kilowattheure en heures pleines et  $P_{HC}$  le prix du kilowattheure en heures creuses.

*Exprimer le temps limite  $t_{MAX}$  à partir duquel l'énergie emmagasinée en heures creuses sera moins rentable qu'un achat en heures pleines.*

**Q7.** Calculer la valeur de  $t_{MAX}$  et conclure quant à la pertinence de cette stratégie énergétique.

Données numériques :

- $E_0 = 100 \text{ kWh}$
- $\eta_S = 97 \%$
- $A_D = 198 \text{ Wh} \cdot \text{h}^{-1}$
- $P_{HP} = 18 \text{ c€} \cdot \text{kWh}^{-1}$  et  $P_{HC} = 10 \text{ c€} \cdot \text{kWh}^{-1}$

Les capacités de production locale d'énergie et de stockage du site permettent d'envisager des modalités de fonctionnement incluant de l'effacement énergétique programmé en prenant en compte une tarification Heures Creuses/Heures Pleines. La problématique est de permettre une annulation complète de la consommation énergétique vue du réseau ENEDIS sur quelques heures à partir d'une demande issue du fournisseur d'électricité et formulée 24 heures à l'avance.

Le scénario mis en œuvre dans l'étude qui suit concerne une journée de la semaine pendant une période estivale. La plage horaire de l'effacement énergétique est 8h-13h, la plage horaire des Heures Creuses étant définie de 22h à 6h. Le principe de l'algorithme appliqué consiste à charger les éléments de stockage pendant la plage d'heures creuses avec la quantité d'énergie nécessaire puis à restituer cette énergie pendant la phase d'effacement énergétique. Dans le cadre du scénario étudié on néglige le facteur d'autodécharge des éléments de stockage.

Le système de suivi de consommation du site permet d'établir le profil de consommation typique sur une journée de semaine en période estivale. Ce profil est disponible sur le document ressource DR1.

**Q8.** Déterminer  $W_{conso}$  la quantité d'énergie requise pour faire fonctionner le site pendant la période d'effacement énergétique envisagée.

Le site est équipé d'un dispositif permettant de mesurer les données météorologiques instantanées mais aussi de consulter, via internet, les prévisions des journées à venir. Le document ressource DR2 précise les équations permettant de calculer la trajectoire du soleil en fonction du jour de l'année et de l'heure. L'équation définissant le flux lumineux incident sur un panneau photovoltaïque est également fournie. Les panneaux photovoltaïques sont orientés plein sud, on a donc  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

**Q9.** Déterminer l'expression du flux incident  $G_{inc}$  en fonction de l'angle  $\alpha_{sol}$ .

**Q10.** Calculer  $W_{prod}$  la quantité d'énergie qui sera produite par les panneaux photovoltaïques pendant la période d'effacement énergétique.

Données numériques :

- journée du 30 juin soit  $j = 181$
- latitude du site  $\lambda = 43,6043^\circ$
- constante d'ensoleillement  $G = 900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

**Q11.** On néglige le facteur d'autodécharge des dispositifs de stockage.

Calculer  $W_{eff}$  la quantité d'énergie qui devra être disponible dans les éléments de stockage à la fin de la plage horaire des heures creuses pour permettre l'effacement énergétique souhaité.

La charge des éléments de stockage est effectuée à puissance constante  $P_C$  sur l'ensemble de la plage horaire des heures creuses.

**Q12.** Calculer la puissance  $P_C$  nécessaire à l'effacement énergétique souhaité. Conclure quant à l'augmentation de puissance absorbée sur la plage horaire des heures creuses du point de vue du réseau ENEDIS.

**Q13.** Compte tenu de l'ensemble de l'étude menée dans la partie A, formuler une conclusion sur la rentabilité des stratégies de pilotage d'énergie mises en œuvre.

## Partie B : étude du stockage inertiel de l'énergie

L'objectif de cette partie est d'étudier les choix technologiques effectués dans la conception du système de stockage inertiel.

Le projet Smart ZAE utilise un modèle de volant d'inertie très innovant capable de stocker une énergie de 10 kWh. Le volant d'inertie est constitué d'un corps en fibre de carbone couplé à une machine synchrone à aimants permanents. Ce type de volant utilise des paliers magnétiques pour réduire les pertes par frottement. La fréquence de rotation du volant d'inertie se situe entre 0 et 14 000 tr/min. Les données du constructeur du volant d'inertie indiquent :

- un rendement énergétique de 97 %,
- une durée de vie 100 fois plus longue que les meilleures batteries,
- un temps d'autodécharge supérieur à 3 semaines.

Le document ressource DR3 présente un cycle de fonctionnement pour une chaîne de stockage inertiel et présente la convention de puissances positives retenue sur le schéma fonctionnel de l'installation étudiée.

**Q14.** Pour les phases 1 et 2 illustrées sur le document ressource DR3, indiquer le signe des puissances  $P_{BUS}$ ,  $P_{PV}$ ,  $P_{VI}$ .

La géométrie du volant d'inertie est illustrée sur le document ressource DR4. L'arbre du volant sera considéré comme un cylindre homogène en titane de rayon  $r_1$  et de hauteur  $h_1$ . Le volant est considéré comme un cylindre homogène de fibre de carbone de rayon intérieur  $r_1$ , de rayon extérieur  $r_2$  et de hauteur  $h_2$ . On néglige l'influence de la machine synchrone sur l'inertie équivalente du volant. On note  $m_1$  la masse de l'arbre en titane et  $m_2$  la masse du volant en fibre de carbone.

**Q15.** Donner l'expression littérale de  $J_v$  inertie du volant en fonction de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ .

**Q16.** Calculer le moment d'inertie du volant et conclure quant à la capacité énergétique de stockage affichée par le constructeur.

Les grandes vitesses de rotation induisent des problèmes technologiques qui peuvent conduire à l'éclatement du volant si certaines conditions ne sont pas respectées. En effet, l'énergie stockée dans le volant est directement liée à la nature du matériau qui le constitue. La masse volumique du matériau et sa résistance à la rupture limite la capacité de stockage du volant. L'étude qui suit doit permettre de vérifier que les choix technologiques retenus par le constructeur assurent l'intégrité du matériel.

La vitesse périphérique maximale exprimée en  $\text{m.s}^{-1}$  d'un cylindre creux en rotation s'exprime par la formule suivante :

$$V_{pmax} = \frac{3 + \mu}{4} \left( 1 + \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \left( \frac{R_{in}}{R_{ex}} \right)^2 \right) \sqrt{\frac{R_E}{\rho}}$$

où  $R_E$  est la limite d'élasticité du matériau,  $\mu$  le coefficient de Poisson du matériau,  $\rho$  la masse volumique du matériau,  $R_{in}$  est le rayon intérieur du cylindre et  $R_{ex}$  est le rayon extérieur du cylindre.



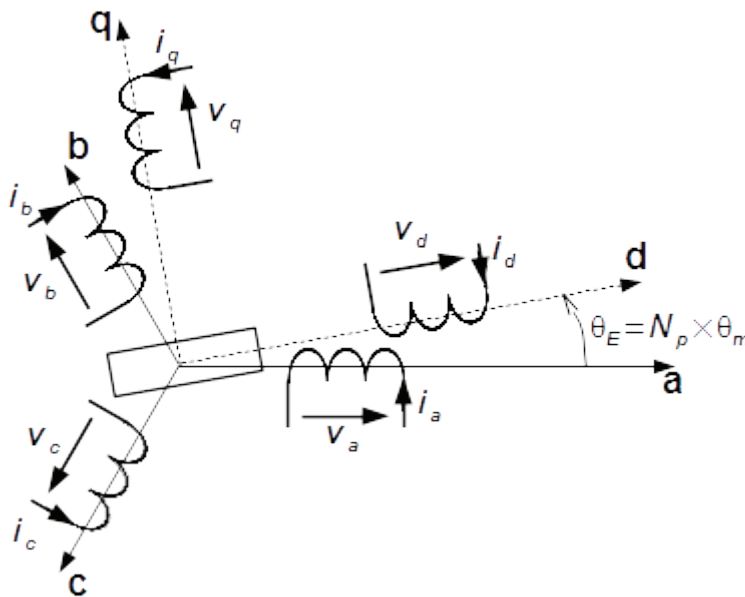
**Q17.** Calculer la vitesse angulaire maximale que peut supporter le disque de carbone. Conclure quant à la plage de vitesse de rotation affichée par le constructeur.

Données numériques :

- limite d'élasticité de la fibre de carbone  $R_E = 2500 \text{ MPa}$
- coefficient de Poisson de la fibre de carbone  $\mu = 0,35$

Le volant d'inertie est entraîné par une machine synchrone. Son stator porte trois enroulements à  $N_p$  paires de pôles, supposés parfaitement identiques et décalés de  $120^\circ$ . Ces enroulements statoriques sont couplés en étoile. Le rotor à pôles lisses (entrefer constant) inclut un aimant permanent qui génère un flux  $\Phi_r = \Phi_{EXC} \cos(\theta_E)$  où  $\Phi_{EXC}$  est une constante et  $\theta_E$  la position angulaire du rotor dans l'espace électrique. La vitesse de rotation maximale du volant d'inertie est de 14 000 tr/min. On supposera que la machine synchrone n'est pas saturée. Les intensités des courants circulant au stator sont considérées comme parfaitement sinusoïdales et forment un système triphasé. Les champs magnétiques et les forces magnétomotrices de l'induit sont à répartition spatiale sinusoïdale.

La résistance d'un enroulement est notée  $R_s$ . On négligera les inductances de fuite au stator. On note  $\Phi_x$  le flux totalisé dans la bobine « x ». La position et la vitesse de rotation angulaire du rotor sont respectivement notées  $\theta_m$  et  $\Omega_m$ . L'angle électrique et la vitesse de rotation angulaire associée sont respectivement notés  $\theta_E$  et  $\omega_E$ .



**Q18.** Justifier le choix d'une machine synchrone à pôles lisses pour la motorisation du système de stockage inertiel. Détailler les conséquences de ce choix sur la structure du système de commande.

**Q19.** Déterminer dans le repère « abc » l'expression temporelle de  $\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix}$  en fonction de

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \text{ et de } \begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{pmatrix}.$$

La transformée de Park permet de déterminer une machine diphasée équivalente dans le repère « dqo » où o est un axe virtuel perpendiculaire au plan « dq ». Le passage des grandeurs physiques du repère « abc » vers le repère « dqo » se fait grâce à la matrice de passage  $P(\theta_E)$ .

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{pmatrix} = P(\theta_E) \times \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad P(\theta_E) = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{vmatrix} \cos \theta_E & \cos(\theta_E - 2\pi/3) & \cos(\theta_E + 2\pi/3) \\ -\sin \theta_E & -\sin(\theta_E - 2\pi/3) & -\sin(\theta_E + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{vmatrix}$$

On a alors :

$$\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = P^{-1}(\theta_E) \times \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad P^{-1}(\theta_E) = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{vmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_E - 2\pi/3) & -\sin(\theta_E - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_E + 2\pi/3) & -\sin(\theta_E + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{vmatrix}$$

La matrice  $P(\theta_E)$  vérifie la propriété  $P(\theta_E) \times \left( \frac{d}{d\theta_E} (P^{-1}(\theta_E)) \right) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ .

**Q20.** Déterminer dans le repère « dq » l'expression temporelle  $\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix}$  en fonction de  $\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}$ , de  $\begin{pmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{pmatrix}$  et de  $\omega_E$ .

On note  $L_d$  et  $L_q$  les inductances propres respectives des enroulements équivalents « d » et « q ».

**Q21.** Déterminer l'expression temporelle de  $\begin{pmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{pmatrix}$  en fonction de  $L_d, L_q, i_d, i_q$  et  $\Phi_{EXC}$ . En déduire l'expression de  $\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix}$  en fonction de  $\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix}$ ,  $\omega_E$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  et  $\Phi_{EXC}$ .

**Q22.** En déduire l'expression du couple électromagnétique  $C_{em}$  de la machine synchrone en fonction de  $L_d, L_q, i_d$  et  $i_q$ .

Le rotor de la machine synchrone est à pôles lisses et à forces magnétomotrices sinusoïdales ce qui implique  $L_d = L_q = L_s$  où  $L_s$  est l'inductance cyclique de la machine synchrone. On notera  $J_m$  le moment d'inertie ramené à l'axe de la machine synchrone. Le couple résistant présent sur l'axe du moteur est supposé constant de valeur  $C_r$ .

**Q23.** Établir la relation entre  $J_m$ ,  $\Omega_m$ ,  $C_r$ ,  $\Phi_{EXC}$  et  $i_q$ . Justifier le choix de contrôler en boucle fermée les grandeurs  $i_q$  et  $i_d$ . Justifier le choix d'une référence nulle pour la grandeur  $i_d$ .

Le schéma de la structure interne du convertisseur est fourni sur le document ressource DR5. Cette structure prend en entrée une référence de puissance électrique à absorber/restituer et contrôle la machine synchrone en conséquence.

**Q24.** À l'aide des relations établies précédemment compléter le document réponse DRP2 représentant le schéma bloc modélisant la machine synchrone dans le repère « dq ».

On suppose que les grandeurs estimées  $\widehat{i}_d, \widehat{i}_q, \widehat{\omega}_E$  sont très proches des valeurs  $i_d, i_q, \omega_E$  du modèle de la machine synchrone.

**Q25.** Établir la relation entre  $v_d^*$  et  $i_d$  ainsi que la relation entre  $v_q^*$  et  $i_q$ . Justifier la présence du bloc de découplage dans le circuit de commande.

Le principe de la commande retenue nécessite une connaissance à tous les instants de la position et de la vitesse angulaire du moteur. Comme l'illustre la figure du document ressource DR5 la solution technologique retenue consiste à obtenir cette information à l'aide d'un observateur.

**Q26.** Justifier le choix d'une commande sans capteur physique. Indiquer les conséquences de ce choix sur le système de commande.

L'observateur retenu est constitué d'un Filtre de Kalman Etendu. Le principe de fonctionnement de ce filtre est détaillé dans le document ressource DR6. Le vecteur d'état

utilisé par l'observateur est  $X_k = \begin{pmatrix} i_{d_{k+1}} \\ i_{q_{k+1}} \\ \omega_{E_{k+1}} \\ \theta_{E_{k+1}} \end{pmatrix}$  et le vecteur commande est  $u_k = \begin{pmatrix} v_{d_k} \\ v_{q_k} \end{pmatrix}$ . On

note  $T_e$  la période d'échantillonnage de l'observateur. Les variables observables choisies sont  $z_k = \begin{pmatrix} i_{d_k} \\ i_{q_k} \end{pmatrix}$ . L'expression du vecteur  $f(X_k, u_k)$  est établie à l'aide d'une approximation des dérivées selon la méthode d'Euler, ainsi la dérivée temporelle d'une grandeur  $G$  est approchée par la formule  $\frac{dG}{dt} = \frac{G_{k+1} - G_k}{T_s}$ .

**Q27.** Établir l'expression du vecteur  $f(X_k, u_k)$ .

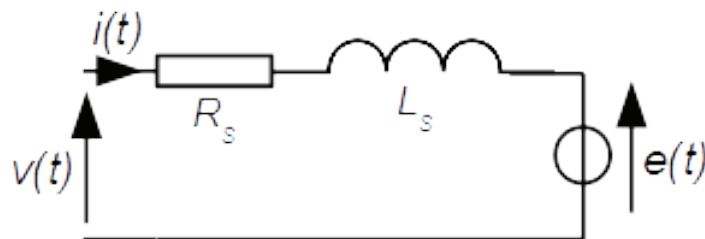
**Q28.** Déterminer l'expression des matrices jacobiniennes  $A_{k+1}$  et  $H_{k+1}$ .

**Q29.** Compte tenu de l'ensemble de l'étude menée dans la partie B, préciser les choix technologiques effectués qui permettent une optimisation du rendement du volant d'inertie. Analyser l'impact de ces choix sur la structure du volant et du convertisseur associé.

## Partie C : étude de l'onduleur alimentant les volants d'inertie

L'objectif de cette partie est d'étudier la structure de l'onduleur utilisé dans les volants d'inertie.

L'étude sera menée sur un seul bras d'un onduleur se trouvant entre le bus continu de l'installation et une phase de la machine synchrone entraînant le volant d'inertie. Le schéma équivalent d'une phase de la machine synchrone en convention récepteur avec les hypothèses d'usage en régime stationnaire est rappelé sur la figure ci-dessous :



Où  $R_s$  est la résistance de l'enroulement statorique et  $L_s$  l'inductance cyclique

La tension  $e(t)$  est supposée sinusoïdale, on note  $e(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t)$ . La tension  $v(t)$  est produite par l'onduleur à partir de la tension du bus continu. Cette tension est composée d'un fondamental et d'harmoniques selon sa décomposition de Fourier. On a :

$$v(t) = V_1\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} V_n\sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n).$$

On note  $P_p$  la puissance électromécanique à fournir au moteur synchrone pour maintenir le régime stationnaire. On considère que cette puissance doit être portée par le fondamental du courant.

**Q30.** Représenter le schéma équivalent de la phase d'une machine synchrone si on ne considère que le fondamental de la tension  $v(t)$ . Représenter le diagramme de Fresnel associé à ce schéma équivalent.

**Q31.** Déterminer les valeurs à donner à  $V_1$  et  $\varphi_1$  pour maintenir le régime stationnaire de la machine synchrone tout en minimisant les pertes par effet Joule au stator.

**Q32.** Indiquer les conséquences liées à la présence d'harmoniques sur la tension  $v(t)$  quant au fonctionnement du moteur et à son rendement.

Le document ressource DR7 présente la forme d'onde et la décomposition spectrale des premiers harmoniques de tensions issues d'onduleur à structures multiniveaux.

**Q33.** Conclure quant à l'intérêt d'augmenter le nombre de niveaux dans la structure de l'onduleur du point de vue du rendement.

Le document ressource DR7 présente la décomposition spectrale d'une tension issue d'un onduleur à quatre niveaux utilisant une Modulation de largeur d'Impulsion (MLI).

**Q34.** Conclure quant à l'intérêt d'associer une MLI à une structure multiniveaux du point de vue du rendement.

La constitution d'un bras de l'onduleur est illustrée sur le document ressource DR8. Il s'agit d'une structure à capacités flottantes composées de cellules mises en série. Les tensions aux bornes des condensateurs sont supposées constantes. Les deux interrupteurs d'une même cellule sont commandés de manière complémentaire. On note  $p$  le nombre de cellules mises en série.

**Q35.** Déterminer la contrainte en tension des interrupteurs lorsqu'ils sont en position ouverte. Analyser l'impact du nombre de cellules sur cette contrainte.

Les interrupteurs des cellules sont commandés par la comparaison d'un signal de modulation à des porteuses triangulaires déphasées entre elles d'un angle  $\frac{2\pi}{p}$ . Dans la suite, on se limite à l'analyse d'une structure à deux cellules. La structure étudiée est illustrée dans le document ressource DR8.

**Q36.** Déterminer le nombre de niveaux possibles que peut prendre la tension de sortie.

**Q37.** Compléter les chronogrammes de commutation des interrupteurs CT1 et CT2 du document DRP3.

**Q38.** Compléter le chronogramme de la tension de sortie sur le document réponse DRP3. Indiquer sur ce chronogramme les niveaux maximal et minimal pris par cette tension en fonction de  $V_{DC}$ .

La décomposition spectrale de la tension de sortie est fournie dans le document réponse DRP3.

**Q39.** Comparer la fréquence apparente de la tension de sortie à la fréquence des porteuses utilisées pour commander les interrupteurs de puissance. Justifier l'allure de la décomposition spectrale de la tension de sortie.

De manière générale pour une structure à  $p$  cellules la fréquence apparente  $F_a$  de la tension de sortie est liée à la fréquence de découpage  $F_{dec}$  des interrupteurs de puissance par la relation  $F_a = p \times F_{dec}$ .

**Q40.** Analyser l'impact de l'augmentation du nombre de cellules sur le filtre de sortie.

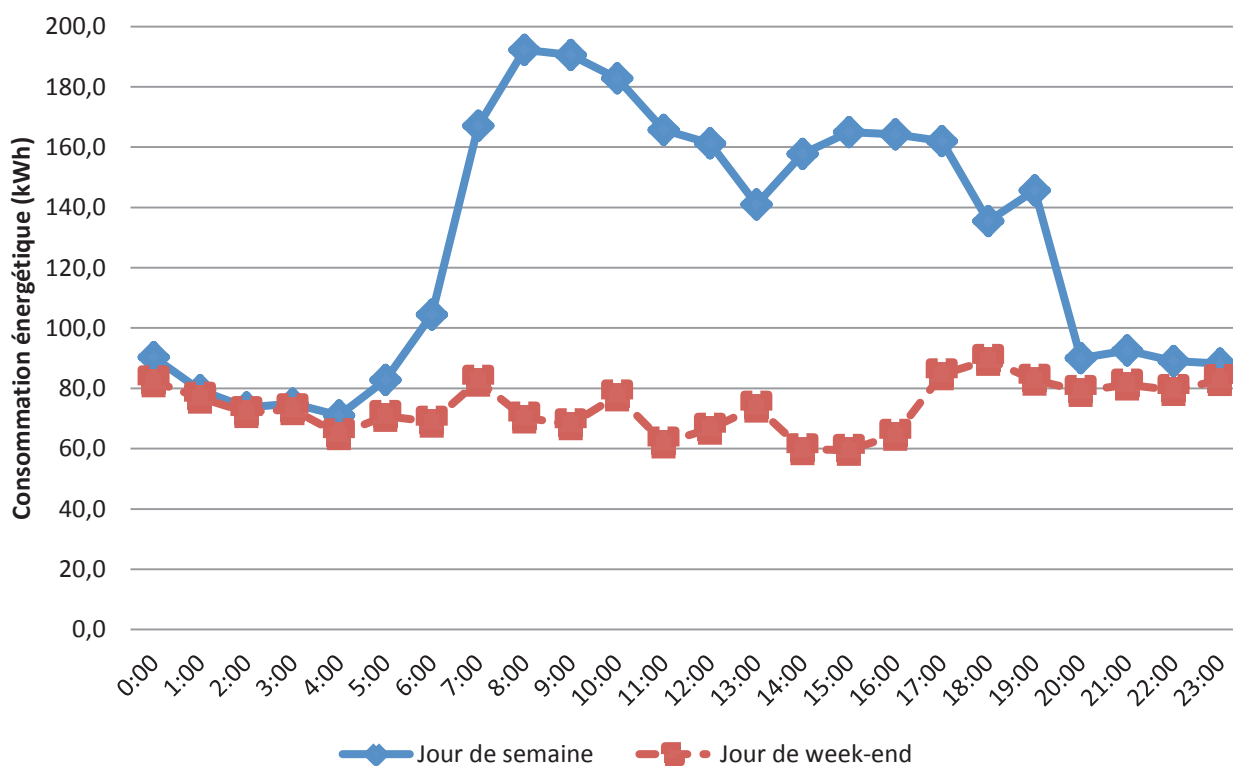
La structure finalement retenue pour l'onduleur est composée de 11 cellules mises en série selon le schéma général fourni dans le document ressource DR8.

**Q41.** Compte tenu de l'ensemble de l'étude menée dans la partie C, formuler une conclusion quant au choix du nombre de cellules et de la structure série à capacités flottantes.

## DR1

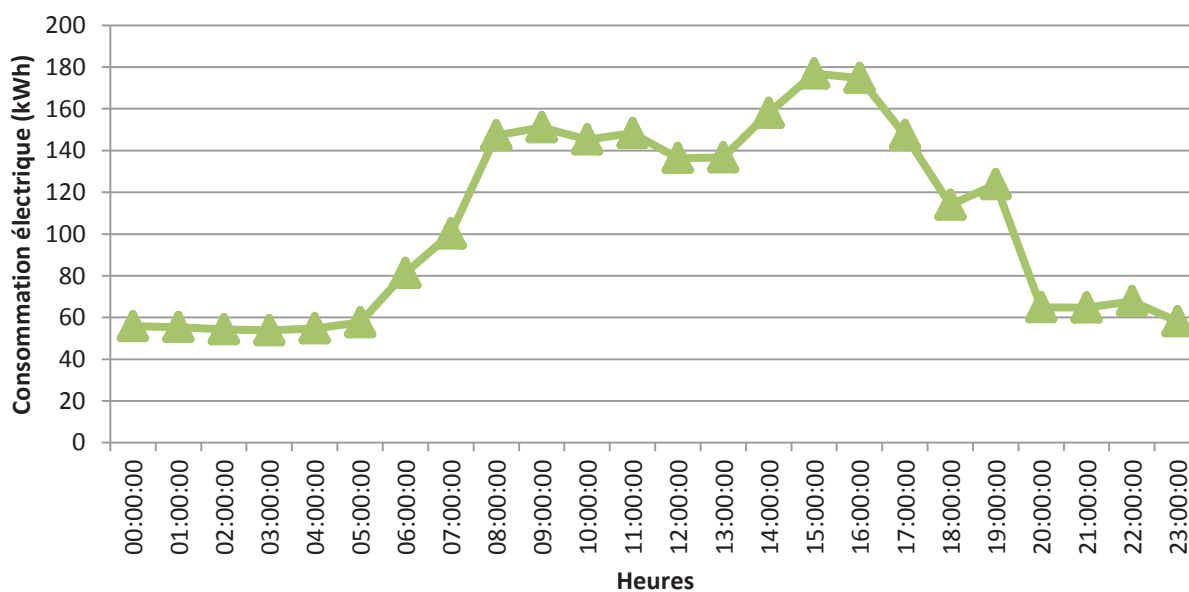
Q2.

## Profil moyen de consommation énergétique



Q8.

## Profil de consommation du site sur une journée de semaine en période estivale

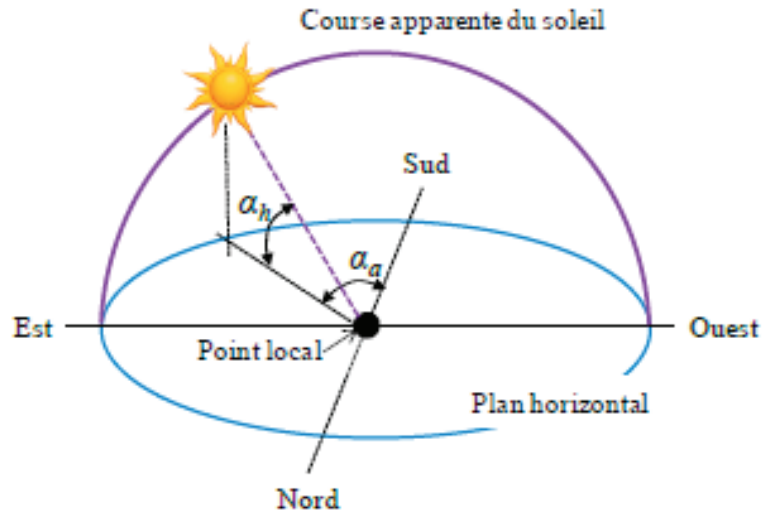


## DR2

Q9.

### Equations de la course solaire

- L'angle de déclinaison :
 
$$\delta = 23,45^\circ \times \sin\left(\frac{2\pi}{365}(j + 284)\right)$$
 où  $j$  est le jour de l'année ( $j = 1$  au 1<sup>er</sup> janvier et  $j = 365$  au 31 décembre pour les années non bissextiles).
- L'angle horaire :
  - $\alpha_{sol} = \frac{\pi}{12}(13 - h)$  pendant l'heure d'hiver
  - $\alpha_{sol} = \frac{\pi}{12}(14 - h)$  pendant l'heure d'été



où  $h$  est l'heure française du jour. On néglige ici l'influence de la longitude sur l'angle horaire.

- La hauteur angulaire  $\alpha_h$  vérifie l'équation :
 
$$\sin(\alpha_h) = \sin(\delta) \times \sin(\lambda) + \cos(\lambda) \times \cos(\delta) \times \cos(\alpha_{sol})$$
 où  $\lambda$  est la latitude du lieu.
- L'azimut vérifie les équations :
 
$$\begin{cases} \sin(\alpha_a) = \frac{\cos(\delta) \times \cos(\alpha_{sol})}{\cos(\alpha_h)} \\ \cos(\alpha_a) = \frac{\sin(\lambda) \times \cos(\delta) \times \cos(\alpha_{sol}) - \cos(\lambda) \times \sin(\delta)}{\cos(\alpha_h)} \end{cases}$$

### Ensoleillement incident sur un panneau

L'ensoleillement incident sur un panneau photovoltaïque se déduit en fonction de  $\alpha_o$  son orientation par rapport au Sud et  $\alpha_i$  son inclinaison par rapport à l'horizontale selon l'équation suivante :

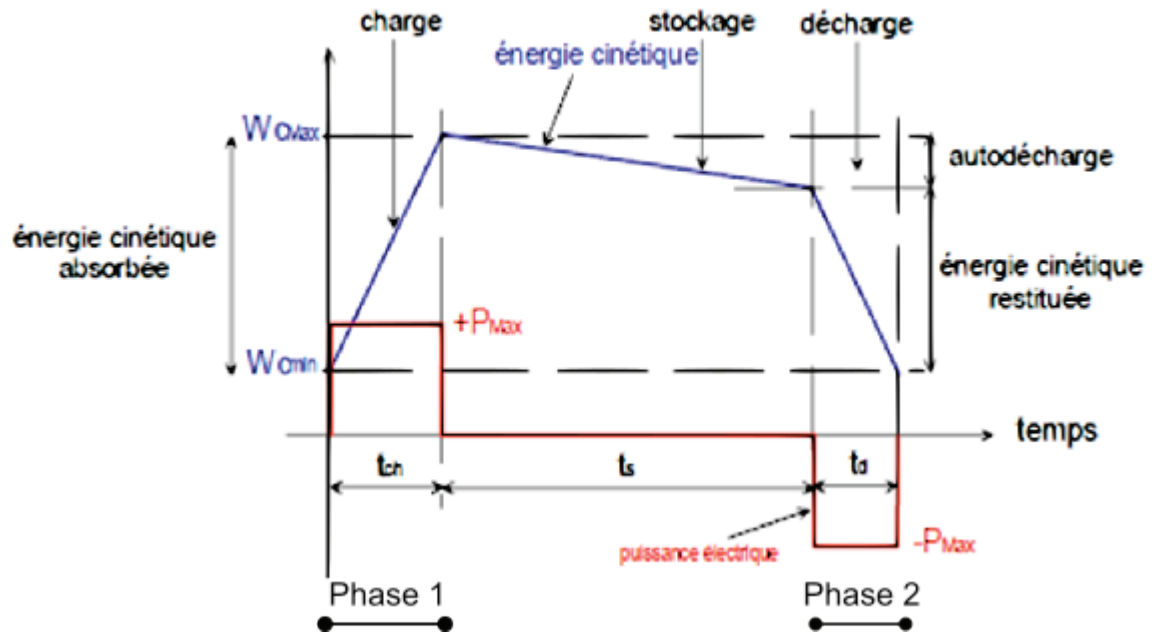
$$G_{inc} = G \times (\sin(\alpha_h) \times \cos(\alpha_i) + \cos(\alpha_h) \times \sin(\alpha_o - \alpha_a) \times \sin(\alpha_i))$$

où  $G$  est une constante déterminée à partir de l'ensoleillement global, des conditions atmosphériques et des conditions météorologiques. On néglige ici le rayonnement réfléchi.

## DR3

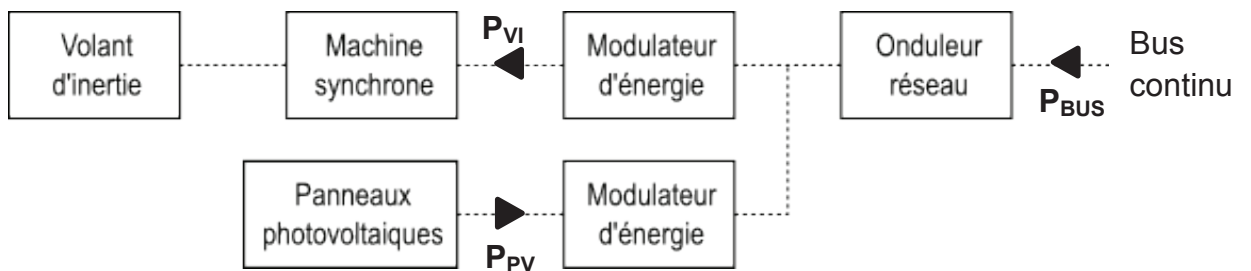
Q14.

Cycle de fonctionnement pour une chaîne de stockage inertiel



Q14.

Convention de puissances positives

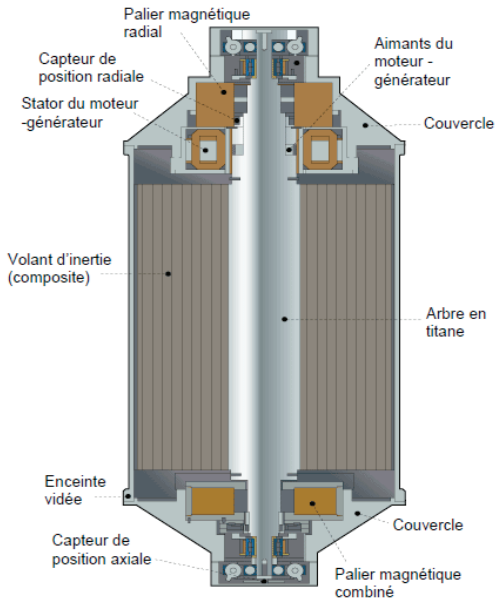




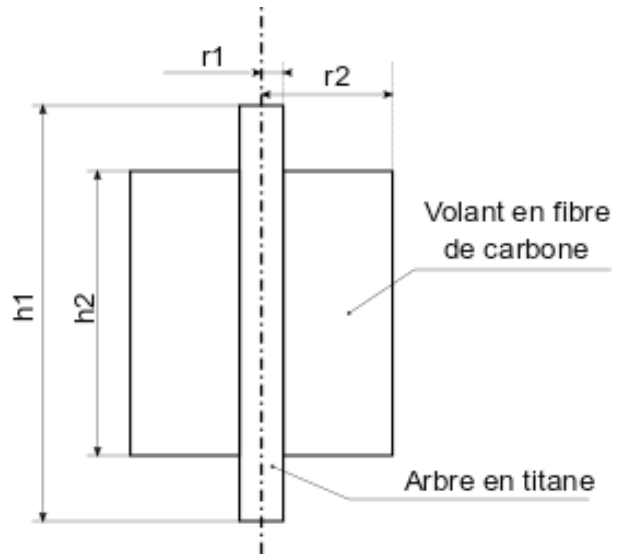
# DR4

## Q15 – Q16.

Coupe du système réel



Modèle simplifié utilisé pour les calculs

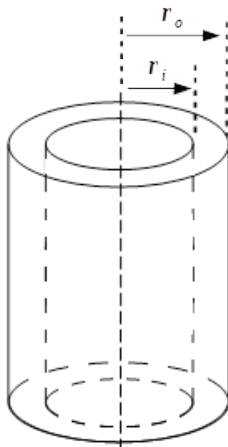


Masse volumique du titane :  $\rho_{Ti} = 4510 \text{ kg.m}^{-3}$

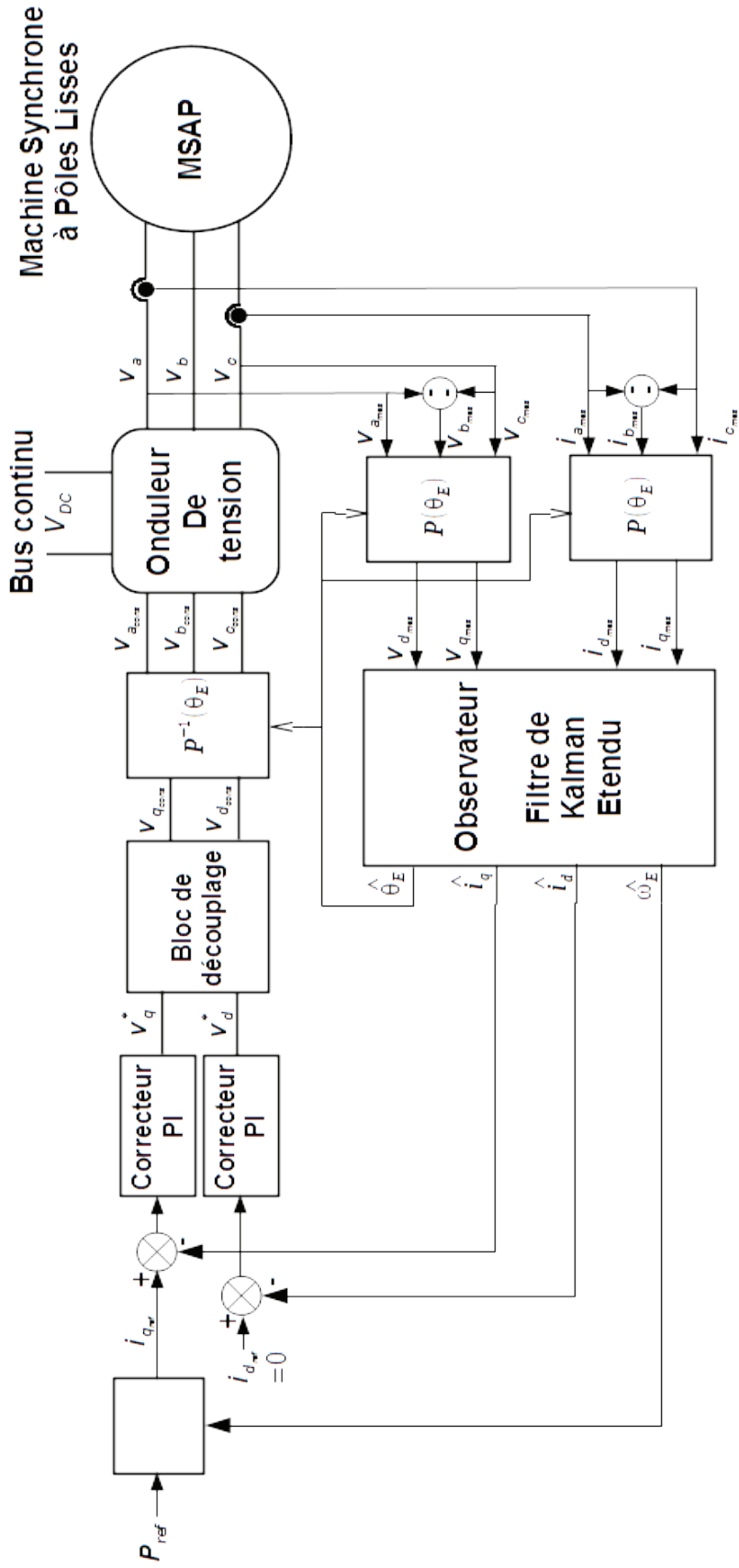
Masse volumique du de la fibre de carbone :  
 $\rho_C = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$

Rep	Désignation	Donnée
$h_1$	Hauteur de l'arbre du volant	1,1m
$h_2$	Hauteur du volant	0,7m
$r_1$	Rayon de l'arbre du volant	0,03m
$r_2$	Rayon extérieur du volant	0,36m

Le moment d'inertie d'un cylindre creux de masse  $m$  en rotation peut être calculé par la formule suivante :



$$J = \frac{1}{2} m (r_i^2 + r_o^2)$$



## DR6

### Q26

Le Filtre de Kalman Étendu permet d'estimer les états d'un système à partir de mesures incomplètes et bruitées. Ce filtre est un filtre non-linéaire permettant une linéarisation locale autour de l'estimation courante. Ce filtre fonctionne sur un processus itératif, chaque itération étant composée de deux étapes :

- Une étape de prédiction qui calcule une estimation  $X_{k+1/k}$  du vecteur d'état en fonction du vecteur d'état précédent  $X_k$  et des commandes  $u_{k+1}$
- Une étape de mise à jour qui détermine un gain correctif à appliquer à l'estimation  $X_{k+1/k}$  en fonction d'une matrice de covariance et de l'écart entre l'estimation  $X_{k+1/k}$  et les variables observables  $z_{k+1}$ .

Le Filtre de Kalman Étendu est applicable sur des systèmes pouvant être modélisés par le système d'équation suivant (les fonctions  $f$  et  $h$  devant être différentiables) :

$$\begin{cases} X_{k+1} = f(X_k, u_{k+1}) \\ z_{k+1} = h(X_{k+1}) \end{cases}$$

Les équations à appliquer pour mettre en œuvre un Filtre de Kalman Étendu sont :

#### Étape de prédiction

- Estimation de l'état suivant :  $X_{k+1/k} = f(X_k, u_{k+1})$
- Estimation *à priori* de la covariance de l'erreur :  $P_{k+1/k} = A_{k+1} P_k {}^t A_{k+1} + Q_k$  où  $Q_k$  est la matrice de covariance du bruit du processus

#### Étape de mise à jour

- Innovation :  $y_{k+1} = z_{k+1} - h(X_{k+1/k})$
- Covariance de l'innovation :  $S_{k+1} = H_{k+1} P_{k+1/k} {}^t H_{k+1} + R_{k+1}$  où  $R_k$  est la matrice de covariance du bruit de mesure
- Gain de Kalman optimal :  $K_{k+1} = P_{k+1/k} {}^t H_{k+1} S_{k+1}^{-1}$
- Etat mis à jour :  $X_{k+1} = X_{k+1/k} + K_{k+1} y_{k+1}$
- Matrice de covariance mise à jour :  $P_{k+1} = (I - K_{k+1} {}^t H_{k+1}) P_{k+1/k}$  où  $I$  est la matrice identité aux dimensions adaptées.

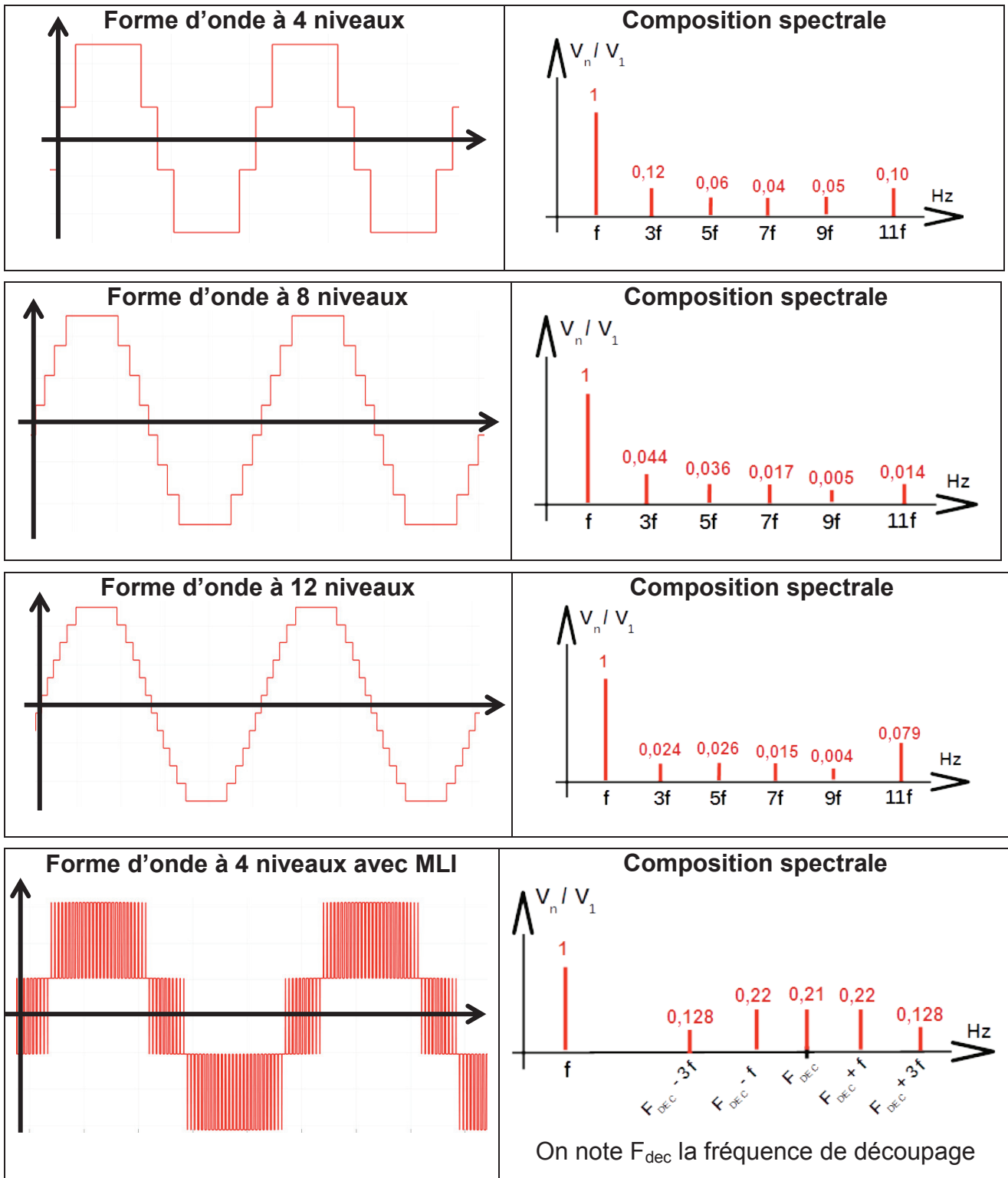
Les matrices  $A_k$  et  $H_k$  sont respectivement appelées matrices de transition de d'observation. Ces matrices jacobiniennes sont déterminées de la façon suivante :

$$\begin{cases} A_{k+1} = \frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{X_k, u_{k+1}} \\ H_{k+1} = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{X_{k+1/k}} \end{cases}$$

## DR7

### Formes et compositions spectrales des tensions issues d'onduleur à structures multiniveaux

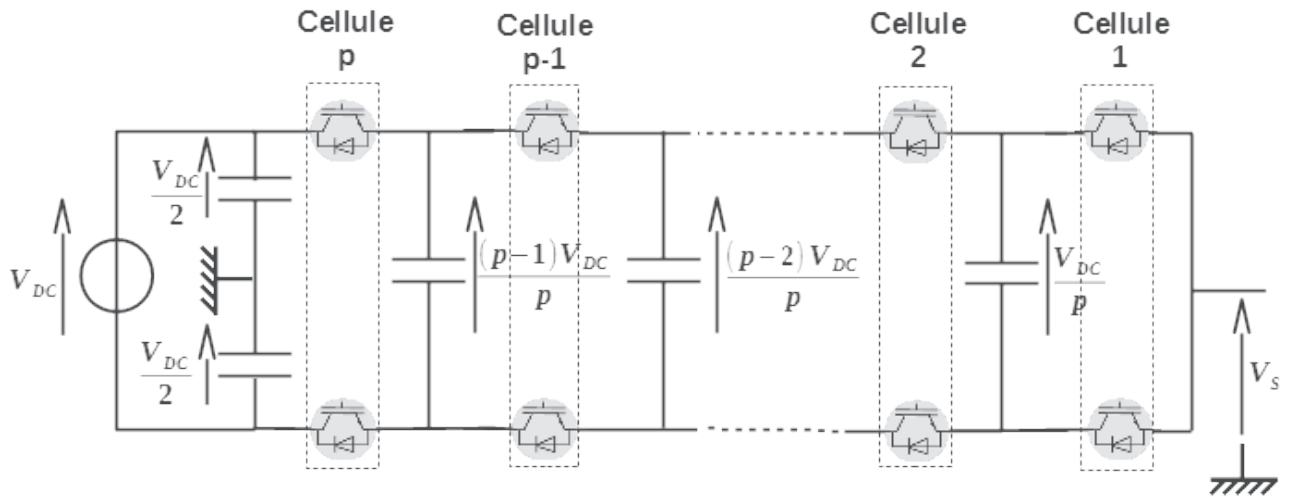
Les compositions spectrales illustrées ci-dessous présentent l'amplitude des premiers harmoniques des tensions. Ces amplitudes sont exprimées relativement au fondamental dont la fréquence est notée « f ».



# DR8

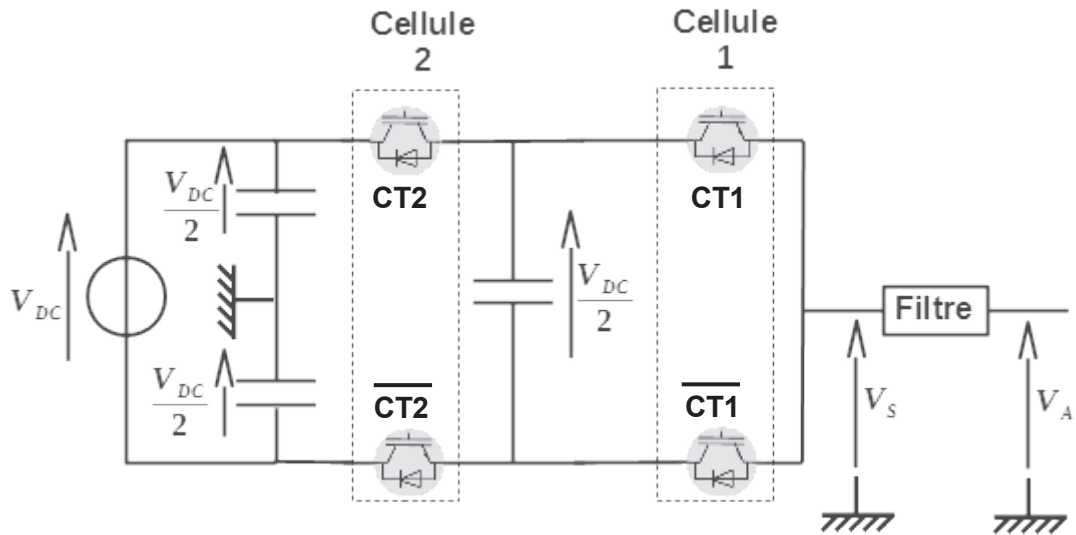
Q35.

## Structure multicellulaire série



Q36.

## Structure à 2 cellules en série

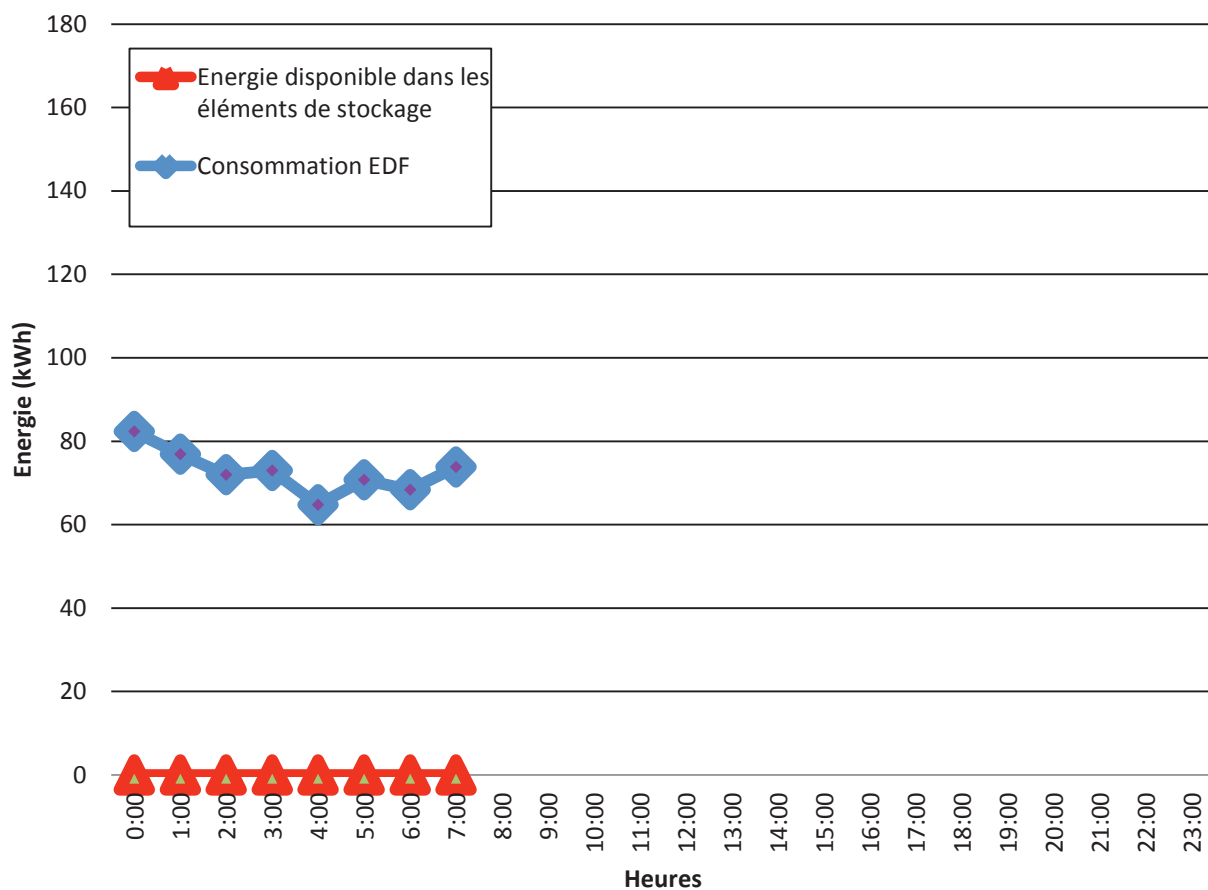
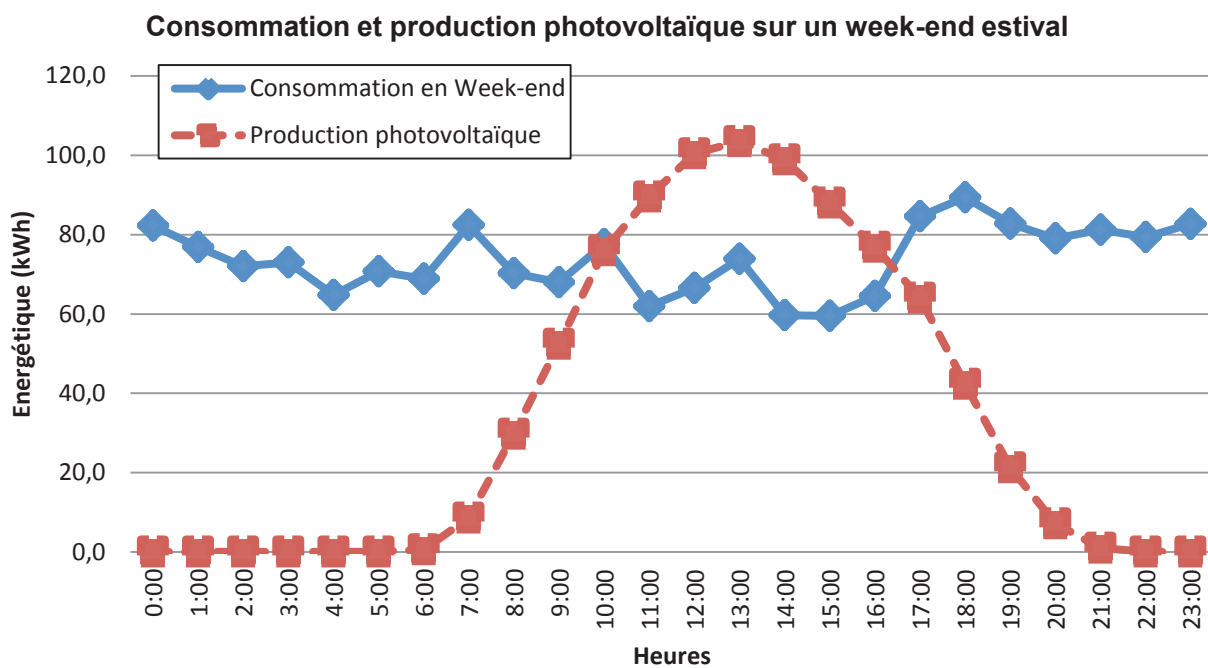


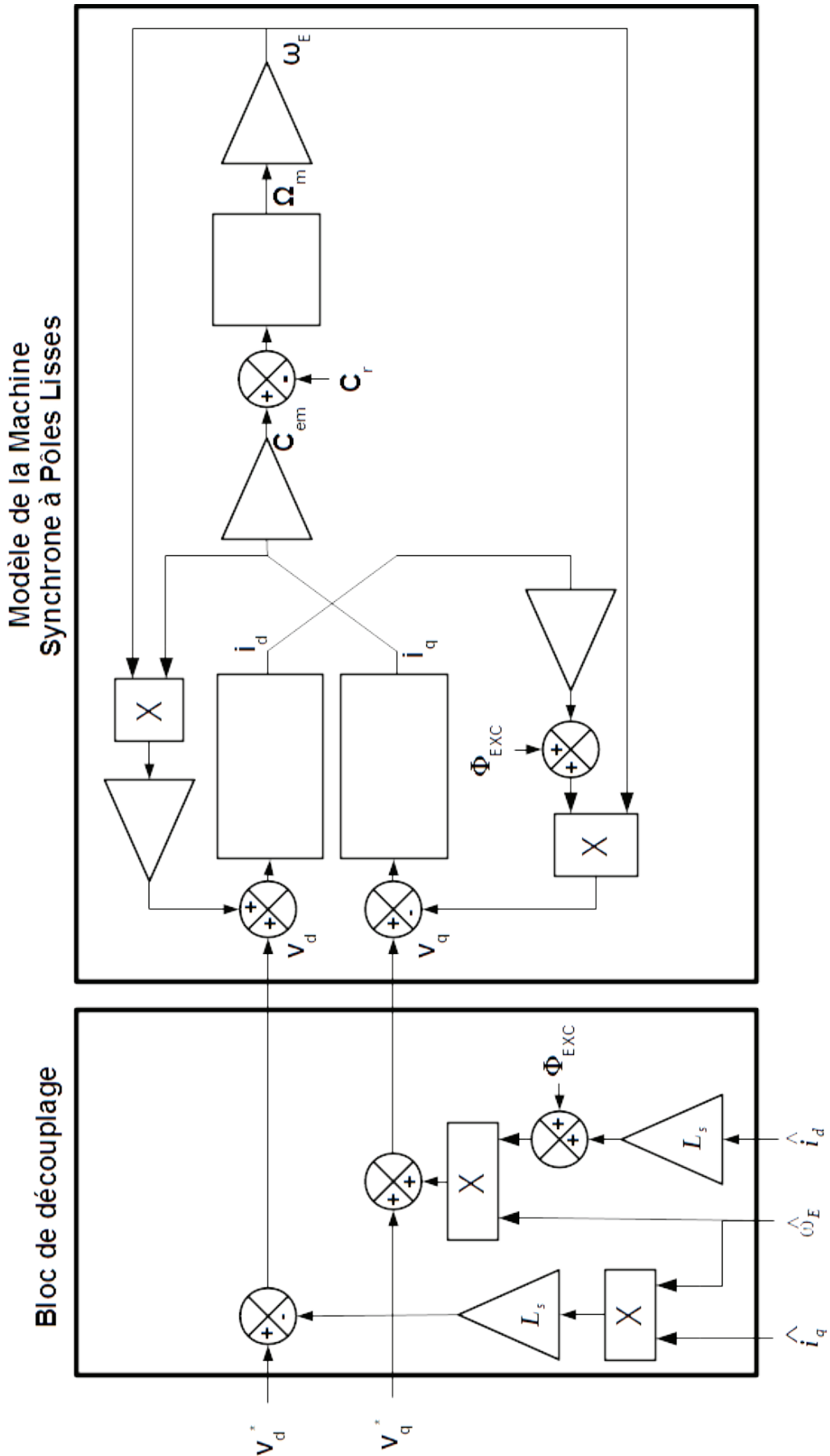


NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

## DRP1

Q3.

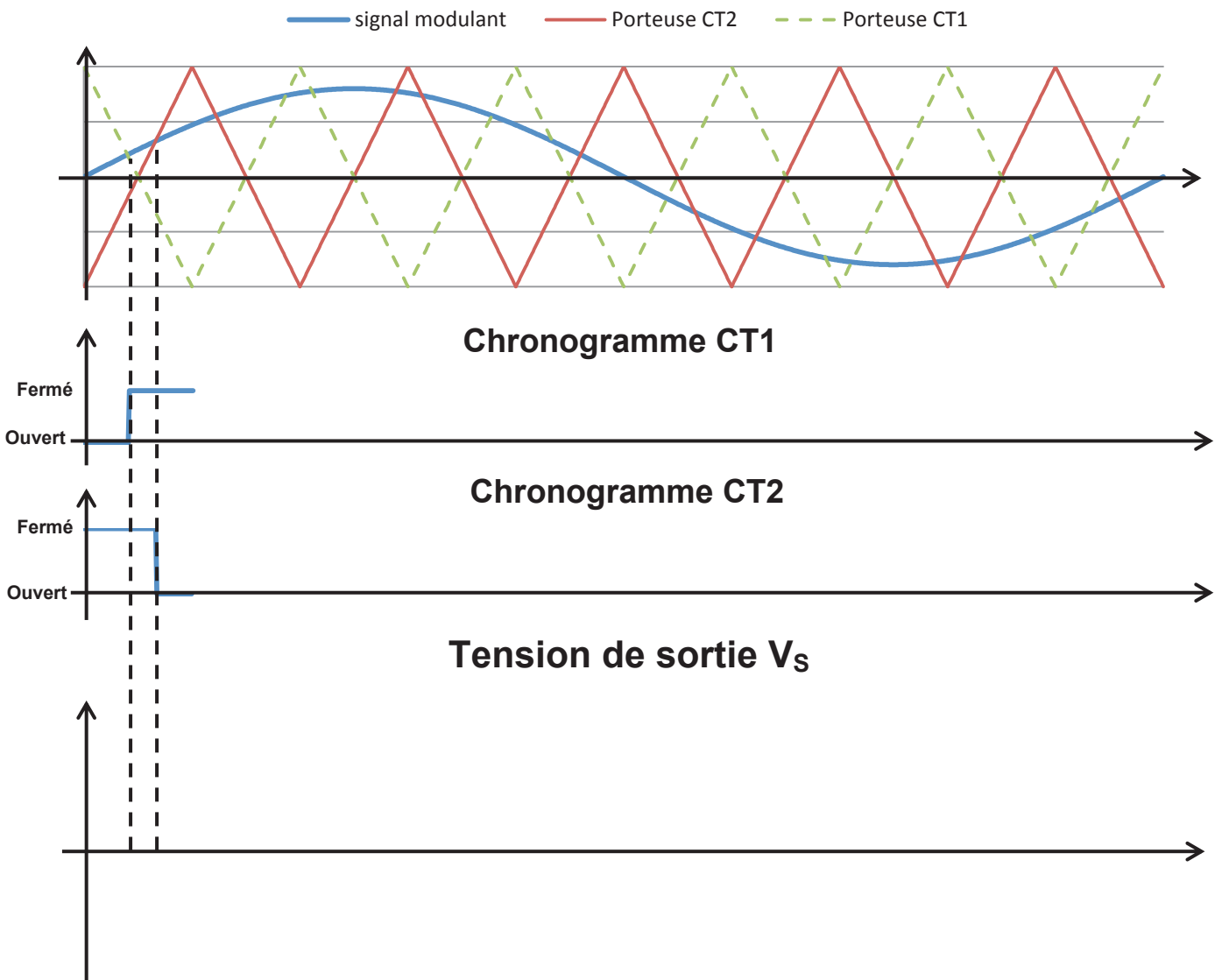






# DRP3

Q37 et Q38.



## Décomposition spectrale de la tension de sortie

La composition spectrale illustrée ci-dessous présente l'amplitude des harmoniques de la tension  $V_S$ . Ces amplitudes sont exprimées relativement au fondamental dont la fréquence est notée « f ». La fréquence des porteuses est notée  $F_P$ .

