

SESSION 2020

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.

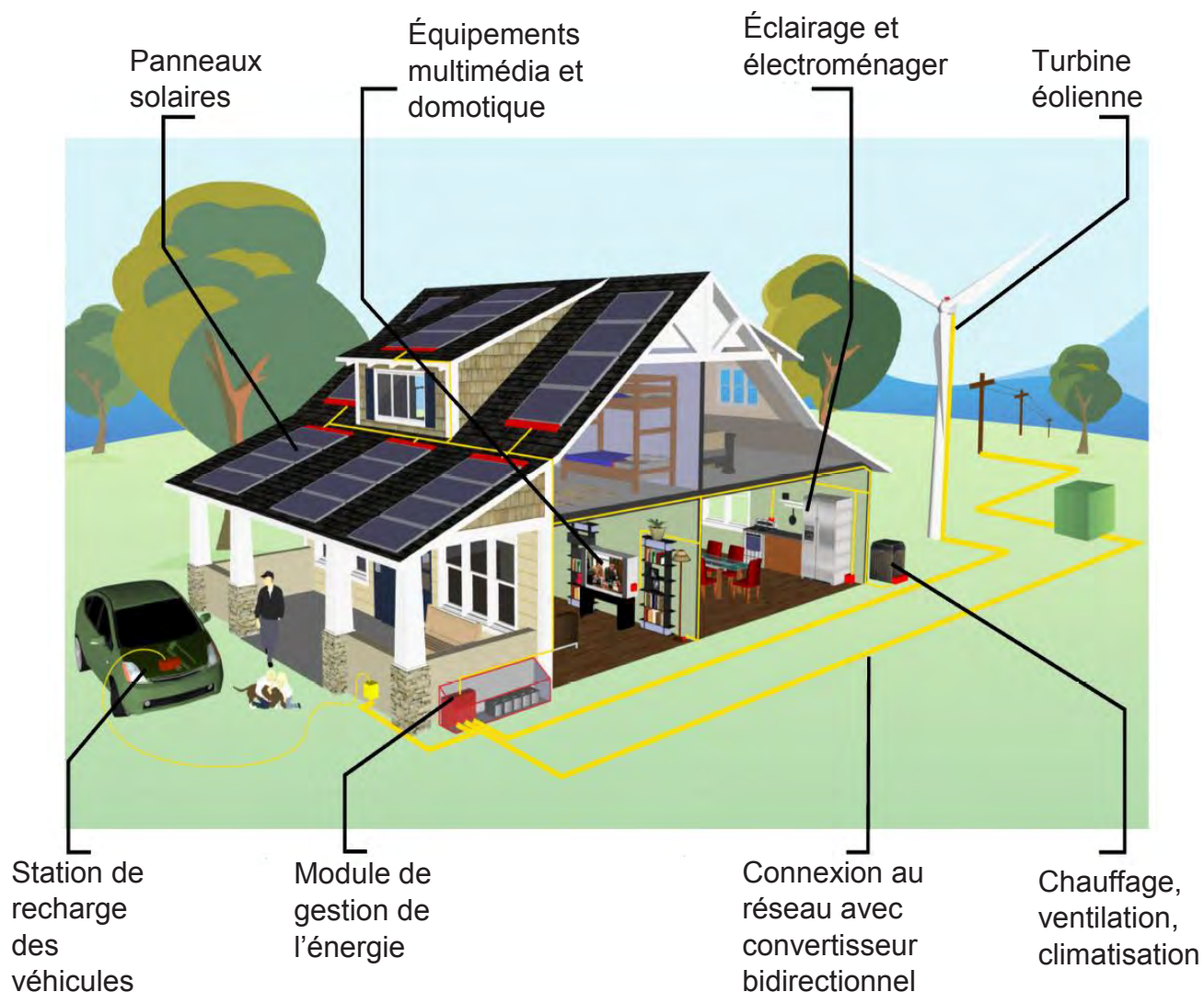
INFORMATION AUX CANDIDATS

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

LE « SMART GRID » AU SERVICE DE L'ALIMENTATION DES CONSOMMATEURS ISOLÉS : NANOGRIDS ET PICOGRIDS



www.cpes.vt.edu

L'alimentation en énergie électrique des consommateurs isolés reste un problème actuel aussi bien en termes de production que de distribution et de gestion de l'énergie. Avec les besoins de connexion aux réseaux de communications en hausse, l'accès des consommateurs isolés à l'énergie électrique devient de plus en plus nécessaire.

Dans les pays peu développés industriellement, les infrastructures de distribution sont moins étendues. L'enjeu est alors d'assurer l'alimentation autonome des sites isolés, avec des possibilités de gestion simple et d'extension prévisible du nombre de consommateurs. La tendance est à l'architecture « picogrid off-grid » qui propose une alimentation continue (24 V ou 48 V) des consommateurs à partir de différentes

sources d'énergie renouvelable (éolien, solaire, hydrolien ...). Le système est fermé mais conçu pour accueillir facilement un certain nombre de nouveaux consommateurs ou de nouveaux moyens de production. Les consommateurs sont alors supposés posséder un équipement limité (éclairage, réfrigérateur, communications légères ...).

Dans les pays industriellement développés, c'est plutôt la volonté d'une réduction de l'impact carbone de la production d'électricité qui constitue l'élément moteur du développement des installations autonomes. On peut y rencontrer deux types d'architecture :

- les installations « off-grid » qui n'ont aucune connexion au réseau de distribution public d'électricité et sont donc totalement autonomes ;
- les installations « on-grid » qui sont reliées au réseau et peuvent prélever comme renvoyer de l'énergie.

Dans tous les cas, il faut noter que l'installation représente un investissement financier non négligeable à la charge du consommateur, y compris au niveau de la gestion de l'énergie et de la maintenance.

En France, on commence à voir se développer des offres matérielles permettant aux particuliers d'assurer tout ou partie de leur consommation électrique à partir d'une production « verte » au moyen de panneaux solaires et d'éoliennes de petite taille, directement connectables au réseau public (comme l'éolienne présentée ci-dessous proposée par la société EOLIE). On parle alors de « nanogrid » si plusieurs sources d'énergie cohabitent pour assurer l'autonomie énergétique d'une seule habitation.



web.eolie-energie.fr

L'ÉOLIE500

est la toute première éolienne à axe vertical que les particuliers peuvent installer seuls, et brancher à une simple prise pour bénéficier d'une énergie en autoconsommation.

Grâce à cette éolienne innovante, design et silencieuse, vous pouvez bénéficier d'une énergie décarbonnée et locale. Facile à assembler, elle ne nécessite pas d'outils lourds ou d'équipement spécifiques pour son montage.

Avec ÉOLIE, accéder à l'éolien en toute simplicité.

Données techniques :

- Hélice de Darrieus, de type hyperboloïdale, pales en carbone.
- Génératrice à aimant permanent de dans le socle, équipé d'un onduleur réseau haut rendement.
- Architecture unique, simple à monter et à entretenir.
- Freinage de sécurité automatique.

De même, pour les particuliers ne disposant pas d'un espace suffisant, on voit apparaître des systèmes permettant d'assurer l'alimentation des appareils disposant d'une connectique USB au moyen d'un petit panneau solaire et du système de gestion du transfert d'énergie adapté (comme celui fourni par la société SKAVENJI présenté ci-dessous).



www.skavenji.fr

- **Un boîtier et une application :**

- Facilitation du branchement et de l'intégration de micro-sources d'énergie, y compris artisanales,
- Consultation de la production personnelle, des économies d'énergie et de l'équivalent CO2,

- **Une plate-forme communautaire pour Makers de l'Énergie :**

- Partage de solutions, montages, plans, tutoriels, émulation et entraide,
- Emergence d'un nouvel écosystème de la récupération, réutilisation et upcycling tournés vers l'énergie.



Le sujet proposé dans la suite porte sur la possibilité d'assurer l'autonomie électrique totale d'une habitation supposée isolée en France.

On y abordera les aspects suivants :

Partie A : étude d'un générateur éolien

Partie B : étude d'une génératrice électrique

Partie C : étude d'un convertisseur AC-DC

Partie A : étude d'un générateur éolien

L'objectif de cette partie est d'étudier la possibilité d'autonomie électrique d'un foyer, principalement à partir de l'énergie éolienne et d'une turbine (ou rotor éolien).

On considère le vent comme de l'air en mouvement.

On s'intéresse à un volume d'air V , de masse m se déplaçant à une vitesse v . On supposera pour l'instant que la pression atmosphérique de l'air est normale au lieu de l'étude ($P_0 = 1013 \text{ hPa}$) et que la température ambiante T (K) y est constante, de même que la masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de l'air.

Q1. Donner l'expression de l'énergie cinétique E_C véhiculée par le volume V d'air considéré.

Dans un dispositif éolien, le volume d'air à considérer est celui balayé par le rotor. La puissance du vent correspond alors à la quantité d'énergie cinétique le traversant à chaque seconde. On se place dans le cas où le dispositif éolien est un rotor dit « face au vent » (ou à axe horizontal) balayant une surface utile S .

Q2. En faisant l'hypothèse que la vitesse v du vent incident est constante et reste la même sur toute la surface du rotor, déterminer la puissance de vent P_{th} théoriquement récupérable par le dispositif.

On voudrait déterminer à présent si un même dispositif éolien fournira la même puissance P_{th} en tout point d'un territoire pour une même vitesse v du vent incident.

Q3. À l'aide de l'Annexe 1, compléter le tableau du Document Réponse 1 et analyser les influences de la température, de l'humidité et de la pression sur P_{th} . En déduire les conditions qui sembleraient être optimales pour l'implantation d'une éolienne.

Sur le Document Réponse 2, on peut voir les données météorologiques correspondant à une même journée pour des lieux différents.

Q4. Compléter le tableau du Document Réponse 2.

Q5. Expliquer pourquoi la pression mesurée en altitude ne correspond pas à celle calculée à l'aide de la formule proposée dans l'Annexe 1.

Q6. Conclure sur la localisation géographique optimale parmi les sites proposés et sur le paramètre le plus important pour l'implantation d'une éolienne.

Une éolienne permet de récupérer l'énergie du vent en déviant celui-ci. La vitesse du vent en amont de l'éolienne sera toujours supérieure à celle en aval pour une même masse d'air balayée. On ne pourra donc jamais récupérer toute la puissance disponible puisqu'un écoulement doit subsister.

L'allemand A. Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{th}$$

Q7. Indiquer le rendement maximal théorique η_{th} de l'éolienne et compléter le Document Réponse 3 dans le cas d'un aérogénérateur de surface S unitaire en traçant l'allure de la puissance maximale unitaire récupérable P_{max} en fonction de la vitesse v du vent incident.

Pour décrire le fonctionnement de l'éolienne, on utilise souvent le paramètre λ (vitesse réduite ou vitesse spécifique ou « Tip-speed ratio ») défini par :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v}$$

R : rayon de la turbine (m)

Ω : vitesse de rotation des pales (rad.s⁻¹)

v : vitesse du vent incident (m.s⁻¹)

Pour tenir compte de l'écoulement non laminaire de l'air et de la friction créée entre les pales, l'énergie éolienne capturée par la turbine est réduite d'un facteur C_p (coefficient de puissance ou facteur de Betz) qui dépend de λ et de l'angle de calage des pales noté β . L'évolution de C_p peut être déterminée par des mesures en soufflerie. La puissance mécanique $P_{méca}$ récupérable sur l'arbre est alors donnée par :

$$P_{méca} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{max}$$

Pour une orientation fixée des pales, on peut relever l'évolution suivante de C_p en fonction de l'architecture du générateur éolien (Figure 1) :

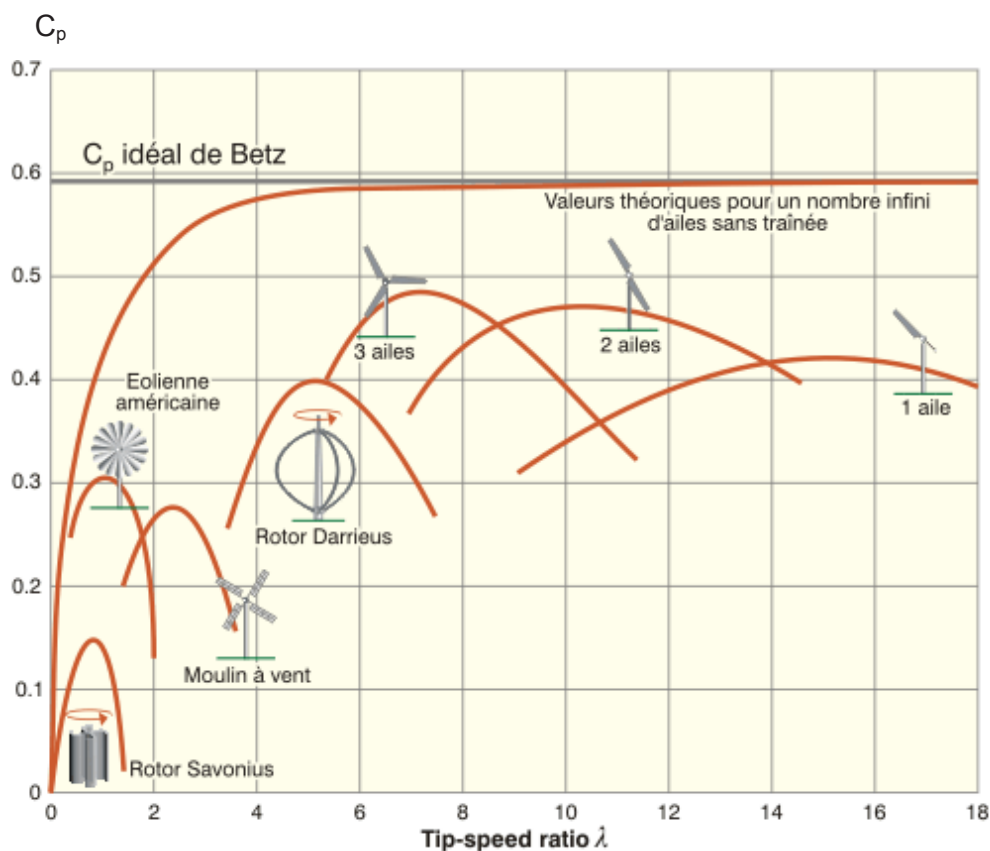


Figure 1

Q8. En vous aidant de la Figure 1, citer quelques avantages et inconvénients des structures à axes verticaux et à axes horizontaux.

Pour la turbine envisagée ici, des essais en soufflerie ont permis de relever les courbes présentées sur la Figure 2 :

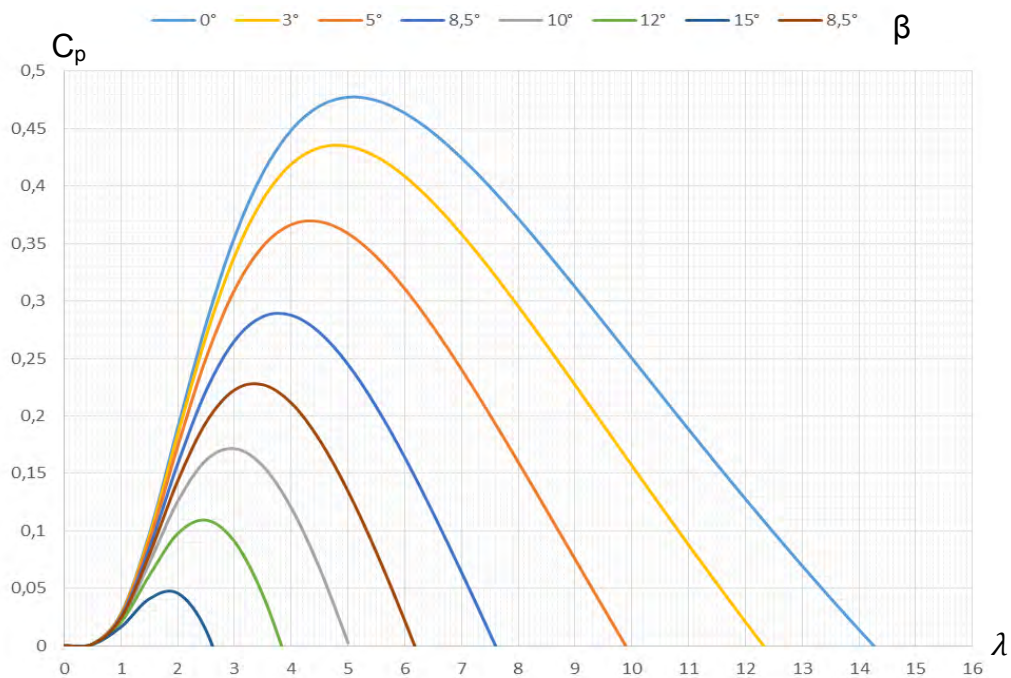


Figure 2

Q9. Expliquer quelle stratégie d'optimisation du transfert de puissance est suggérée par les courbes de la Figure 2.

La turbine éolienne étudiée ici est reliée à un générateur électrique dimensionné pour fournir une puissance nominale P_n . Cette puissance est atteinte à une vitesse de vent incident v_n (vitesse nominale). Lorsque le vent souffle au-delà de v_n , on modifie les paramètres de la turbine afin de travailler à puissance constante P_n . Avec la turbine et la génératrice envisagées ici, on obtient la courbe de la Figure 3 :

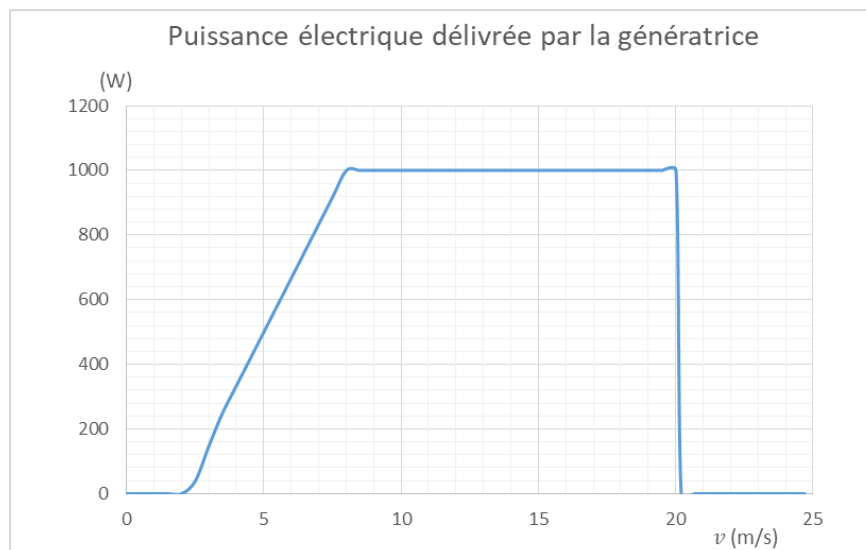


Figure 3

Le fonctionnement à puissance constante est obtenu en modifiant les paramètres mécaniques de la turbine de façon à maintenir une vitesse de rotation mécanique Ω (rad/s) constante. La vitesse nominale de la génératrice utilisée est $N_n = 600$ tr/min.

Q10. On se place dans le cas d'une turbine tripales à axe horizontal balayant une surface utile S unitaire. Déterminer l'intervalle de variation de λ correspondant au fonctionnement à puissance constante de la génératrice.

Q11. En déduire les valeurs extrêmes correspondantes pour C_p et pour l'angle β de calage des pales permettant d'optimiser le transfert énergétique. Reporter les valeurs sur le Document réponse 3.

Dans l'optique d'une production énergétique suffisante pour son auto consommation, le propriétaire du site souhaite savoir si une seule source d'énergie « verte » pourrait assurer son approvisionnement.

Pour cela, on considérera la consommation électrique moyenne journalière donnée par la Figure 4 :

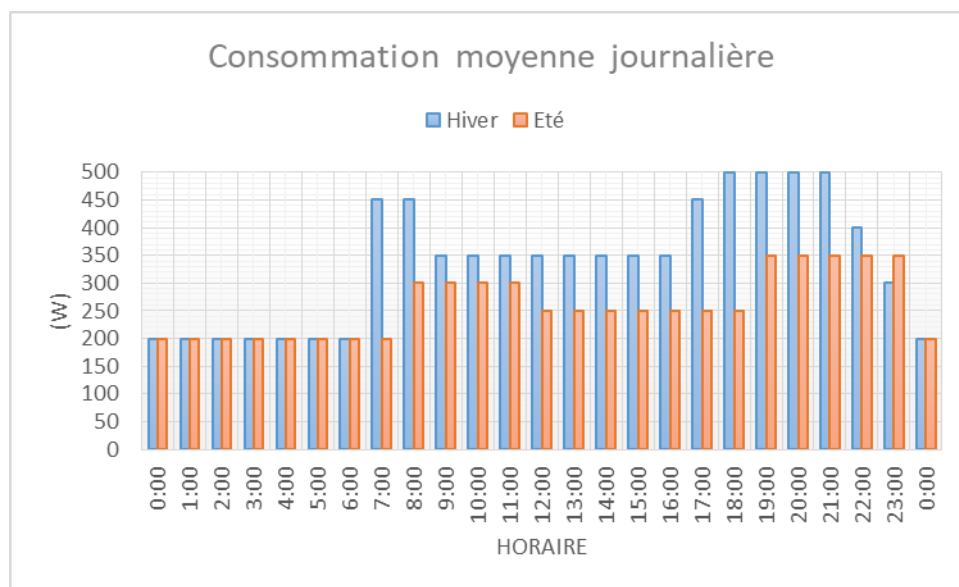


Figure 4

On dispose également de relevés météorologiques concernant les saisons d'hiver et d'été reportés sur l'Annexe 2. Les jours choisis (10 février et 10 août) ont volontairement été pris respectivement lors des mois de plus forte et de plus faible consommations.

Quel que soit le mode de production considéré, on admettra que le système de traitement, de stockage, de conversion et de distribution de l'énergie électrique du consommateur a un rendement $\eta_{cv} = 80\%$.

Q12. En utilisant les données à votre disposition, exprimer la puissance électrique $P_{U_{vent}}$ disponible pour le consommateur à partir de la production éolienne.

Q13. En considérant un rendement des panneaux solaires de $\eta_{sol} = 90\%$, exprimer la puissance électrique $P_{U_{sol}}$ que pourrait fournir au consommateur un ensemble de panneaux solaires de surface $S_{sol} = 1$ m².

Q14. Compléter alors les graphiques du Document Réponse 4 permettant d'illustrer vos réponses.

Q15. Au vu des résultats, établir si l'autonomie énergétique du site envisagé est assurée.

Q16. En faisant la synthèse de vos études, établir quelle stratégie on pourrait envisager pour assurer l'autonomie énergétique du site considéré. Préciser les éventuels avantages et inconvénients qui y seront liés. Vous pourrez également vous appuyer sur les Figures 5 et 6 suivantes.

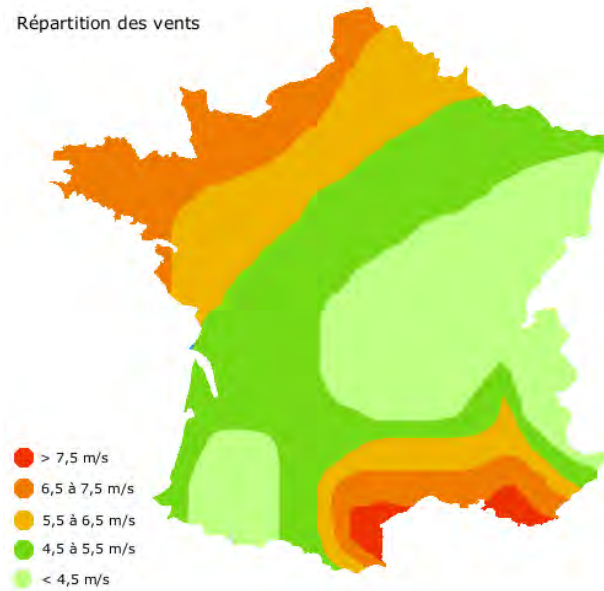


Figure 5

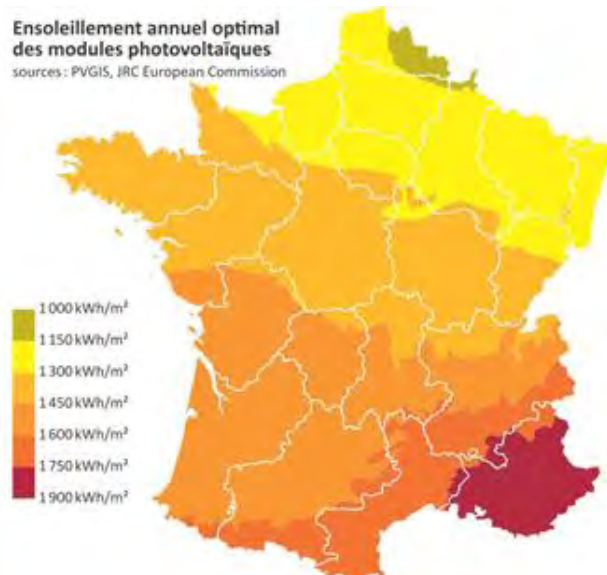


Figure 6

Partie B : étude d'une génératrice électrique

L'objectif de cette partie est l'étude de l'alternateur permettant de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique.

Le propriétaire du site a acheté sur internet un alternateur triphasé bon marché qui a été livré sans aucune documentation et avec une plaque signalétique qui ne mentionne que la puissance nominale, la tension nominale **par phase** et la vitesse de rotation nominale.

$$P_n = 1000 \text{ W}$$

$$V_n = 48 \text{ V}$$

$$N_n = 600 \text{ tr.min}^{-1}$$

Le stator de l'alternateur est couplé en étoile et l'utilisateur dispose de 3 fils pour récupérer l'énergie électrique produite.

Une campagne de mesures a donc été menée et ses résultats sont consignés dans l'Annexe 3.

Q17. Donner un ordre de grandeur de I_n (courant nominal par phase de l'alternateur).

Q18. Déterminer le nombre p de paires de pôles par phase de cet alternateur.

Q19. Rappeler le modèle de Behn-Eschenburg d'une phase de l'alternateur dans le cas d'une machine non saturée fonctionnant en régime permanent. Préciser à quoi correspondent les éléments de ce modèle. Rappeler également le diagramme de Fresnel adapté.

Q20. Rappeler l'expression de la chute de tension approchée due à l'impédance interne d'une phase du stator et la limite de validité du modèle utilisé.

Q21. Déterminer la résistance R_S d'une phase de l'alternateur.

Q22. Déterminer la réactance synchrone d'une phase de l'alternateur. En déduire la valeur de l'élément correspondant.

Pour mettre en place une stratégie de pilotage du transfert d'énergie, il est nécessaire de modéliser convenablement l'alternateur.

Pour cela, on supposera la machine non saturée, à répartition sinusoïdale de flux, et sans amortisseurs. Les tensions et courants au stator seront considérés comme parfaitement sinusoïdaux. Les enroulements du stator sont supposés rigoureusement identiques, comportant chacun p paires de pôles, décalés dans l'espace de 120° les uns par rapport aux autres et couplés en étoile.

Le rotor est à pôles lisses et entrefer constant, et porte un aimant permanent qui génère un flux constant Φ_r selon son axe.

Dans la suite on négligera toute forme de pertes magnétiques ainsi que les inductances de fuites du stator. On notera R_S la résistance d'une phase du stator et L_x son inductance.

On raisonnera par la suite sur le schéma de la Figure 7 :

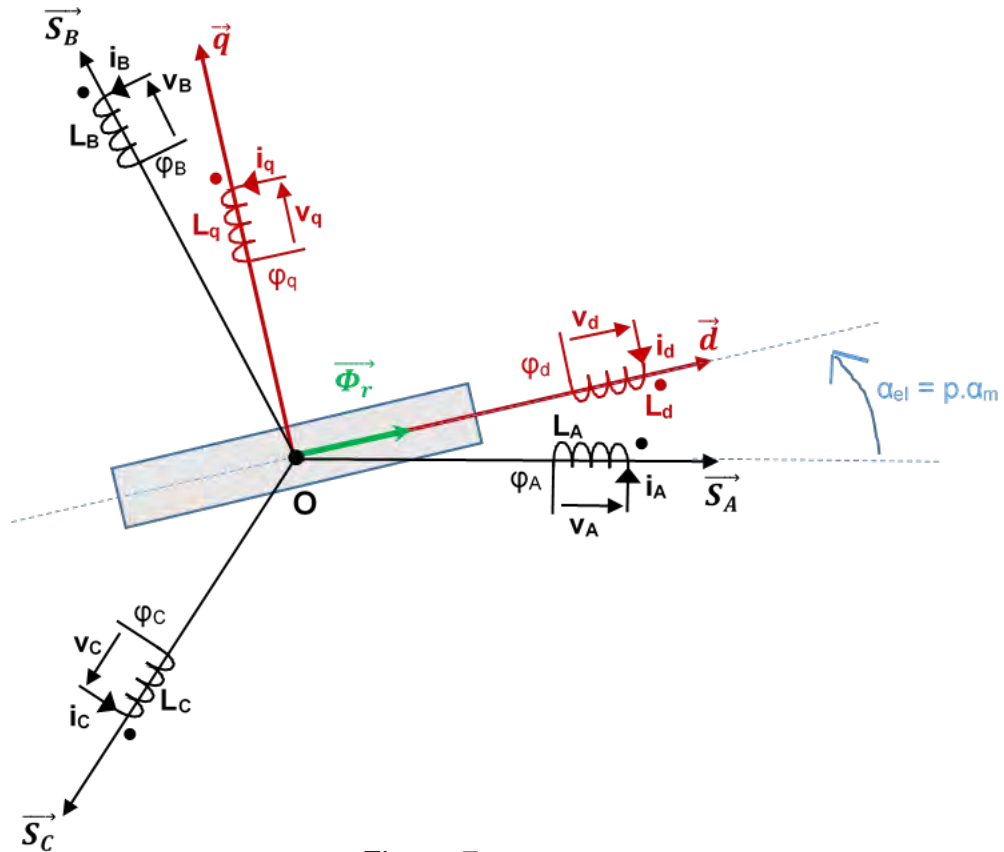


Figure 7

On utilise à présent les notations suivantes :

p : nombre de paires de pôles par phase du stator

$\alpha_{el} = (\vec{S}_A, \vec{d}) = \omega_{el}.t$: angle électrique

ω_{el} : pulsation électrique telle que $\omega_{el} = 2\pi f = p\Omega_m$

f : fréquence des courants et tensions au stator

α_m : position mécanique du rotor

Ω_m : vitesse angulaire du rotor

$\vec{S}_x, \vec{d}, \vec{q}$: axes magnétiques des enroulements x, d, q ($x = A, B, C, d, q$ selon les cas)

ϕ_x : flux totalisé dans l'enroulement x

L_x : inductance propre de l'enroulement x

$[X]_y$: représentation matricielle de la grandeur X dans le repère y

Le passage du système de 3 enroulements « ABC » lié au stator au système équivalent « dqo » de 2 enroulements lié au rotor se fait au moyen de la matrice de passage $P(\alpha_{el})$.

Les axes \vec{d} et \vec{q} sont en quadrature et la composante d'indice « o » est portée par un axe orthogonal au plan (d,q). Elle est introduite dans le but de pouvoir inverser mathématiquement la transformation et vaut 0 si la somme des composantes correspondantes dans le repère « ABC » est nulle.

La position du repère « dqo » du rotor par rapport au repère « ABC » du stator est repérée par l'angle $\alpha_{el} = (\vec{S}_A, \vec{d})$.

On peut alors écrire :

$$[x]_{dqo} = P(\alpha_{el}) \cdot [x]_{ABC} \quad \text{et} \quad [x]_{ABC} = P^{-1}(\alpha_{el}) \cdot [x]_{dqo} \quad \text{avec}$$

$$P(\alpha_{el}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_{el} & \cos\left(\alpha_{el} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha_{el} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\alpha_{el} & -\sin\left(\alpha_{el} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\alpha_{el} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{matrice orthogonale}$$

$$P^{-1}(\alpha_{el}) = P^T$$

$$P(\alpha_{el}) \times \frac{d}{d\alpha_{el}} (P^{-1}(\alpha_{el})) = [M] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L'expression adoptée ici pour $P(\alpha_{el})$ permet de travailler avec une transformation qui conserve la puissance instantanée.

Q23. Rappeler l'intérêt de cette transformation mathématique dans le repère « dqo ».

On assimile chaque phase x du stator à un enroulement de résistance R_s et d'inductance L_x soumis à une variation de flux total $\varphi(t)$ et parcouru par un courant $i(t)$. La tension aux bornes de l'enroulement est alors notée $v(t)$ comme le montre le schéma de la Figure 8 :

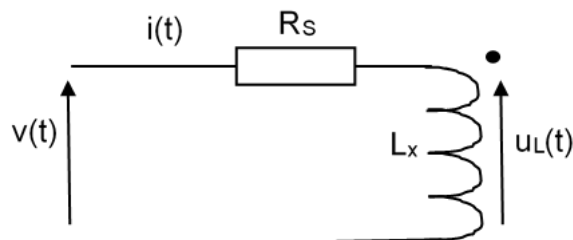


Figure 8

Q24. Ecrire la loi de Faraday et la loi des mailles pour cet enroulement.

Q25. En déduire l'expression liant $[v]_{ABC}$, $[\varphi]_{ABC}$ et $[i]_{ABC}$ dans le repère « ABC ».

Q26. Etablir l'expression liant $[v]_{dqo}$, $[\varphi]_{dqo}$ et $[i]_{dqo}$ dans le repère « dqo ».

Q27. En déduire les expressions de v_d et v_q en fonction de i_d , i_q , φ_d et φ_q .

Q28. Etablir les expressions de φ_d et φ_q en fonction de i_d , i_q , L_d , L_q et du flux inducteur Φ_r constant produit par le rotor.

Q29. En déduire les expressions temporelles de v_d et v_q en fonction de i_d , i_q et Φ_r .

Q30. Etablir l'expression de la puissance globale instantanée $p_s(t)$ mise en jeu au stator. Expliciter les différents termes.

Q31. En déduire l'expression du couple électromagnétique $C_e(t)$ développé.

Q32. Le rotor étant à pôles lisses avec un entrefer constant et des forces magnétomotrices à répartition spatiale sinusoïdale, on peut établir que $L_d = L_q = L_S$ (inductance cyclique par phase). On notera J_m le moment d'inertie total de l'ensemble de la partie mécanique ramené sur l'axe de la machine synchrone. Celle-ci entraîne une charge imposant un couple résistant noté $C_R(t)$. Etablir l'équation électromécanique liant alors la machine et la charge.

Q33. On souhaite contrôler le couple tout en minimisant les pertes joules. Expliquer quelles seront les conséquences pour le pilotage de i_d et i_q .

Lorsque l'alternateur est associé à son éolienne, le couple électromagnétique $C_e(t)$ doit être piloté pour pouvoir assurer le fonctionnement à puissance électrique fournie constante nominale P_n dès lors que la vitesse du vent dépasse une valeur nominale v_n et reste inférieure à la vitesse maximale admissible v_{max} .

On suppose que l'axe de l'ensemble est équipé d'un capteur qui mesure la vitesse de rotation Ω_m et que l'on peut également mesurer la vitesse v du vent incident. Le schéma bloc de l'ensemble de la chaîne est donné sur le Schéma 1 du Document réponse 5. On supposera que le convertisseur considéré doit délivrer une tension continue de valeur fixée V_{DC} .

On notera s l'opérateur de Laplace dans les calculs suivants si besoin.

Q34. Compléter les blocs vides sur le Schéma 1 du Document réponse 5.

Q35. On considère le bloc « Découplage et calcul » du Schéma 1 précédent. Ecrire les relations liant $V_d(s)$, $V_q(s)$, $I_d(s)$ et $I_q(s)$ dans le domaine de Laplace. Compléter alors les cases vides du Schéma 2 du Document Réponse 5, qui représente une partie du processus de calcul permettant d'élaborer les consignes V_{dcons} et V_{qcons} .

On s'intéresse à présent à la stratégie d'optimisation du transfert de puissance. Il a été établi dans la Partie A que la puissance mécanique fournie par l'éolienne peut s'écrire :

$$P_{méca} = C_P(\lambda, \beta) \cdot P_{max}$$

$$\lambda = \frac{R\Omega_m}{v}$$

R : rayon de la turbine (m)

Ω_m : vitesse de rotation des pales ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

v : vitesse du vent incident ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

$C_P(\lambda, \beta)$: coefficient de puissance ou facteur de Betz

β : angle de calage des pales de la turbine

La vitesse v du vent incident étant une variable non maîtrisable par l'utilisateur, on aura donc intérêt à éliminer des formulations mathématiques, tout en optimisant le transfert d'énergie. Les études de la turbine ont permis d'établir le réseau de courbes suivant (Figure 9) :

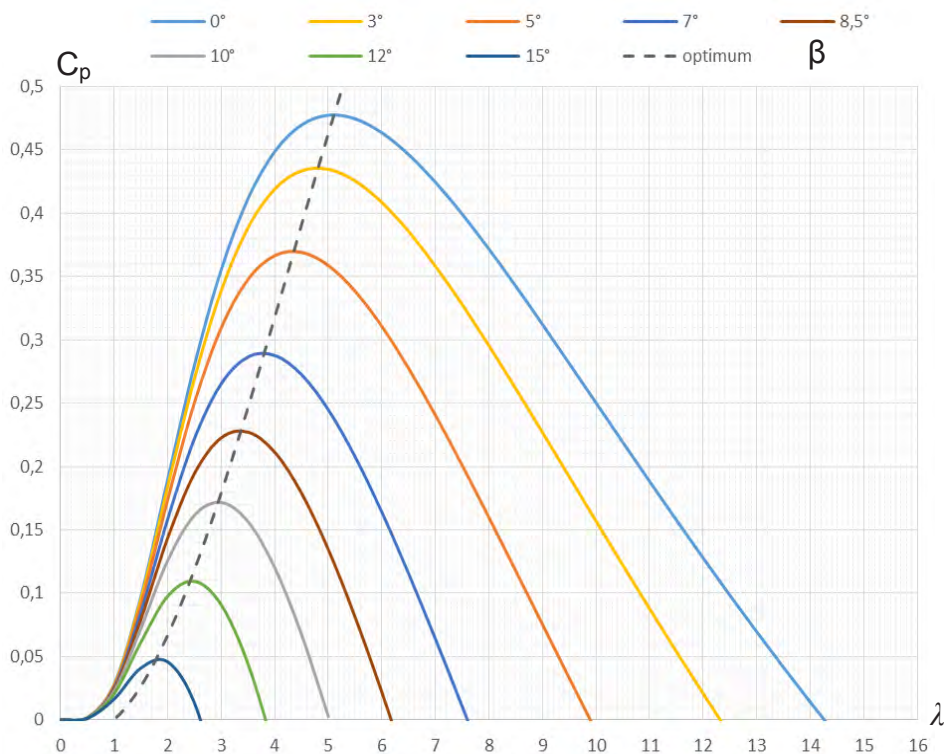


Figure 9

Q36. Indiquer quelle courbe de la Figure 9 devra être exploitée par l'algorithme d'optimisation du transfert d'énergie.

Q37. On se place dans le cas où l'on arrive effectivement à optimiser le transfert d'énergie. On appellera $P_{méca}^{opt}$ la puissance mécanique utilisable dans ce cas. Etablir l'expression de $P_{méca}^{opt}$ ne contenant plus la vitesse v du vent incident. On se placera dans le cas d'une surface balayée par les pales S unitaire.

Q38. En négligeant toutes les pertes, en déduire quelle sera l'expression correspondante du couple électromagnétique développé $Ce_{réf}^{opt}$ qui servira à établir la consigne de l'algorithme de transfert et de conversion de l'énergie électrique produite.

Q39. En vous aidant des résultats obtenus dans cette partie B, détailler quels seront les éléments techniques à étudier avant d'envisager la mise en œuvre du système proposé.

Partie C : étude d'un convertisseur alternatif-continu

L'objectif de cette partie est l'étude de quelques caractéristiques de la conversion d'énergie électrique de la forme alternative (fournie par la génératrice synchrone) à la forme continue.

Cette tension continue servira ensuite de source « stable » pour alimenter le consommateur. Cette étape de conversion est indispensable dans la mesure où la production à partir d'une source éolienne fluctue au cours du temps.

Le convertisseur choisi est un « redresseur à commande MLI » qui permettra de transformer l'énergie alternative fournie par la machine synchrone en une énergie continue qui alimentera la suite de la chaîne.

Le schéma de principe du montage étudié est donné Figure 10 :

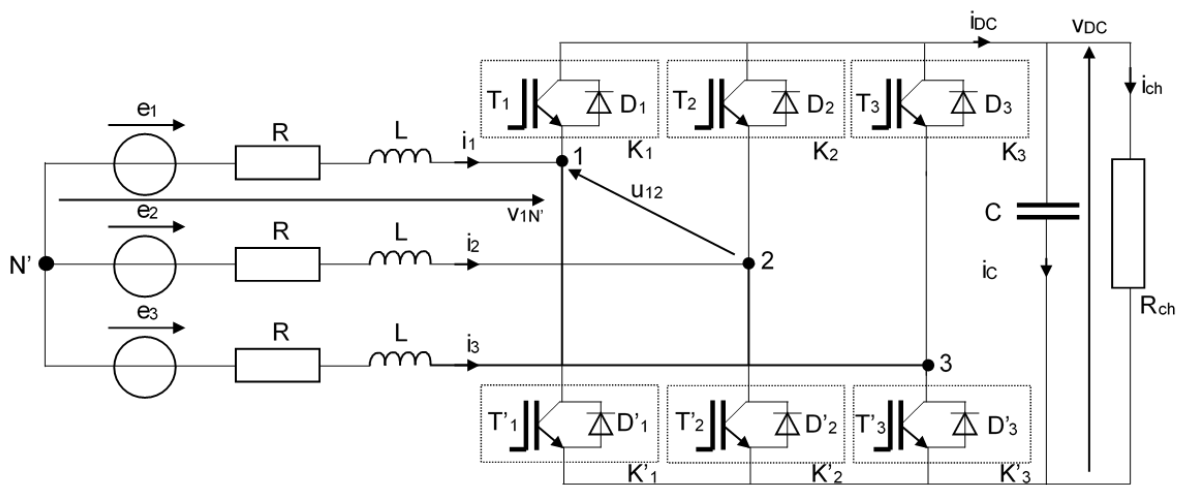


Figure 10

On travaillera pour l'instant avec les hypothèses suivantes :

- Les générateurs e_x produisent un réseau triphasé équilibré de tensions sinusoïdales de fréquence f ($x = 1, 2, 3$).
- Les courants de ligne i_x forment un système triphasé équilibré pour lequel on vérifie $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.
- Les interrupteurs K_x ou K'_x sont composés chacun d'un transistor T_x ou T'_x et d'une diode D_x ou D'_x .
- Les interrupteurs sont commandés de façon périodique à la fréquence de découpage f_P telle que $f_P \gg f$, soit $T_P \ll T$ pour les périodes.
- Les composants T_x , T'_x , D_x et D'_x sont parfaits.
- En régime établi pour un point de fonctionnement, on peut négliger l'ondulation de la tension de sortie v_{DC} devant sa valeur moyenne soit $\Delta v_{DC} \ll V_{DC}$.
- Les commandes des 3 bras de pont sont identiques et décalées dans le temps de $\frac{T_P}{3}$, sans temps mort.

Les interrupteurs d'un même bras de pont sont commandés de façon complémentaire, et on peut définir leur état au moyen de la fonction de connexion S_x suivante :

$$\begin{cases} S_x = 1 \\ S_x = 0 \end{cases} \quad \text{avec} \quad x = 1,2,3$$

Interrupteur fermé si $S_x = +1$
 Interrupteur ouvert si $S_x = 0$

Q40. Compléter les chronogrammes représentatifs des signaux S_x en régime établi sur le Document réponse 6. On prendra comme instant de départ le passage de l'état bas à l'état haut de S_1 avec des états hauts et bas de durées identiques pour l'instant.

Q41. Représenter le schéma équivalent du montage dans l'intervalle de temps $\left[0; \frac{T_P}{6}\right]$ en considérant les sources et les interrupteurs parfaits.

Q42. En déduire les expressions des tensions composées u_{12} , u_{23} et u_{31} en fonction de V_{DC} et de S_x . Représenter u_{12} sur le Document réponse 6.

Q43. Exprimer les tensions $v_{1N'}$, $v_{2N'}$ et $v_{3N'}$ en fonction de V_{DC} et S_x puis représenter $v_{1N'}$ sur le Document Réponse 6.

Q44. Exprimer les tensions e_x en fonction de R , L , i_x et $v_{xN'}$.

On décide d'adopter une stratégie de commande dite « MLI » pour les interrupteurs. Pour élaborer les signaux S_x , on compare des signaux modulateurs sinusoïdaux v_{mx} de fréquence f à une porteuse triangulaire v_p de fréquence f_p . Les signaux S_x obtenus obéissent alors à la loi suivante :

$$\begin{cases} S_x = 1 & \text{si} & v_{mx} > v_p \\ S_x = 0 & \text{si} & v_{mx} < v_p \end{cases}$$

Q45. Expliquer les effets de la stratégie proposée si $f_p \gg f$.

Q46. Compléter le Document réponse 7 avec les signaux S_1 , S_2 et u_{12} .

La tension u_{12} peut être vue comme une succession d'impulsions de durée variable et de fréquence constante. On souhaite que le convertisseur consomme des courants sinusoïdaux de même fréquence f que les tensions produites par l'alternateur. Dans ce cas, les signaux S_x vont être élaborés pour présenter une fréquence apparente f_p égale à la fréquence de découpage, avec un rapport cyclique variable de façon sinusoïdale. Cette variation se fera à la fréquence f souhaitée. On pourra alors écrire :

$$\begin{cases} e_1(t) = E_M \sin(\omega t) \\ e_2(t) = E_M \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3(t) = E_M \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{tensions produites par l'alternateur}$$

Les signaux S_x sont élaborés avec les rapports cycliques suivants :

$$\begin{cases} \alpha_1(t) = \frac{1}{2}[1 + \alpha_M \sin(\omega t)] \\ \alpha_2(t) = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha_M \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ \alpha_3(t) = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha_M \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \end{cases} \quad \text{avec } 0 \leq \alpha_M \leq 1$$

Les courants prélevés sur l'alternateur sont supposés sinusoïdaux et de même fréquence que les tensions, mais déphasés d'un angle φ tel que :

$$\begin{cases} i_1(t) = I_M \sin(\omega t - \varphi) \\ i_2(t) = I_M \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ i_3(t) = I_M \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \end{cases}$$

On se place toujours dans le cas où $f_p \gg f$ avec une tension de sortie du pont v_{DC} constante de valeur V_{DC} .

Q47. Déterminer la variation des courants de ligne $i_x(t)$ et des rapports cycliques $\alpha_x(t)$ sur une période de découpage. Justifier et donner les valeurs des 3 courants et des 3 rapports cycliques si on suppose que l'étude démarre à $t = 0$.

Q48. Exprimer le courant i_{DC} en fonction de i_x et S_x . Calculer alors la valeur moyenne $\langle i_{DC} \rangle$ en fonction de I_M , α_M et φ sur une période de découpage. On considérera que $\langle S_x \rangle = \langle \alpha_x(t) \rangle$.

Q49. En déduire la puissance moyenne P_{DC} transitant par le pont et récupérée par le côté continu si on néglige les pertes dans les interrupteurs.

En plus d'imposer au courant de ligne une forme sinusoïdale et une fréquence f , on souhaite imposer un déphasage $\varphi = 0$ entre courants et tensions. Dans la suite, l'étude se limitera à la phase 1, ce qui revient à écrire :

$$e_1(t) = E\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

$$i_1(t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

Pour la suite de l'étude, on néglige la résistance R (mais pas la bobine L), et on se place à l'échelle de la période de modulation T correspondant à la fréquence f . On assimilera les signaux S_x à leur composante sinusoïdale de fréquence f . On admet que l'on peut vérifier dans ce cas, en passant à la modélisation complexe :

$$\underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = 0$$

Q50. Donner la relation liant alors e_1 , i_1 et V_{DC} dans le domaine complexe.

Q51. Tracer le diagramme de Fresnel correspondant (sans échelle particulière et dans le cas où $\varphi = 0$). En déduire la relation entre V_{DC} , E , α_M et I sachant que $|\underline{S}_1| = \frac{\alpha_M}{2}$.

Q52. Dans la pratique, on est contraint d'imposer $\alpha_M \leq 0,95$ pour tenir compte des imperfections des interrupteurs. En déduire la contrainte sur V_{DC} si $E = 48 \text{ V}$, $I = 7 \text{ A}$, $L = 1 \text{ mH}$ et $f = 60 \text{ Hz}$.

On souhaite à présent déterminer la valeur optimale de l'inductance de raccordement L permettant de limiter l'ondulation du courant de ligne prélevé sur la machine synchrone aussi bien à l'échelle de la période de découpage T_P (pour les hautes fréquences) que de la période de modulation T (pour les basses fréquences).

On s'intéresse d'abord à l'ondulation du courant de ligne produite à l'échelle de la période de découpage T_P . On considère les interrupteurs parfaits et on néglige toujours R .

On peut montrer que l'ondulation du courant sera maximale lorsque la tension produite par la phase correspondante passe par 0. On rappelle que, à l'échelle de la période de découpage, la valeur de $\alpha_x(t)$ reste constante sur toute la durée T_P soit $\alpha_x(t) = \alpha_x(0)$.

La Figure 11 donne une représentation de l'état des fonctions S_x et de l'évolution du courant $i_1(t)$ correspondant pendant la durée T_P considérée, au moment du passage par 0 de la tension e_1 .

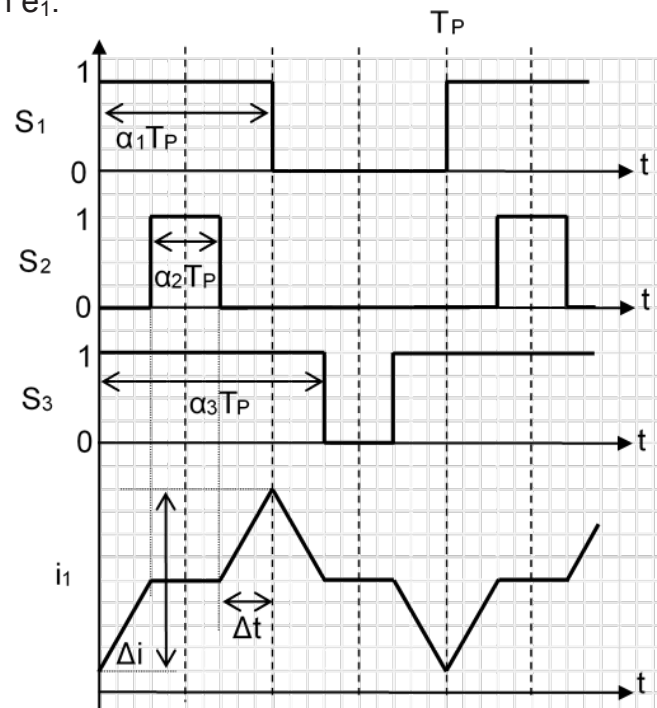


Figure 11

Q53. Donner la valeur de $e_1(t)$ pendant la durée T_P . Etablir dans ce cas l'expression de l'ondulation Δi du courant $i_1(t)$ en fonction de L , T_P et V_{DC} et α_M .

Pour l'étude de l'ondulation basse fréquence du courant de ligne, il est nécessaire de considérer l'existence d'un « temps mort » T_m dans la commande des bras de pont. On peut montrer que l'amplitude de l'harmonique de rang 5 du courant de ligne dû à la perturbation de tension liée au temps mort s'écrit :

$$i_{h5M} = \frac{4V_{DC} \cdot T_m \cdot f_P}{25\sqrt{3} \cdot \pi \cdot L \cdot \omega}$$

Q54. Expliquer pourquoi on doit introduire ce « temps mort » dans la commande des bras de pont.

Q55. Expliquer pourquoi on s'intéresse à l'harmonique 5 et pas à l'harmonique 3 du courant de ligne.

Q56. Sur le Document réponse 8, tracer les courbes représentatives de L en fonction de f_P correspondant aux expressions de Δi et de i_{h5M} . En déduire quel serait le dimensionnement optimal du système permettant de satisfaire ces 2 critères à la fois, avec $V_{DC} = 120 \text{ V}$, $\alpha_M = 0,95$, $T_m = 3 \mu\text{s}$, $f = 60 \text{ Hz}$, $\Delta i = 0,8 \text{ A}$, $i_{h5M} = 0,6 \text{ A}$.

Dans la pratique, le montage utilisé est celui présenté sur la Figure 12.

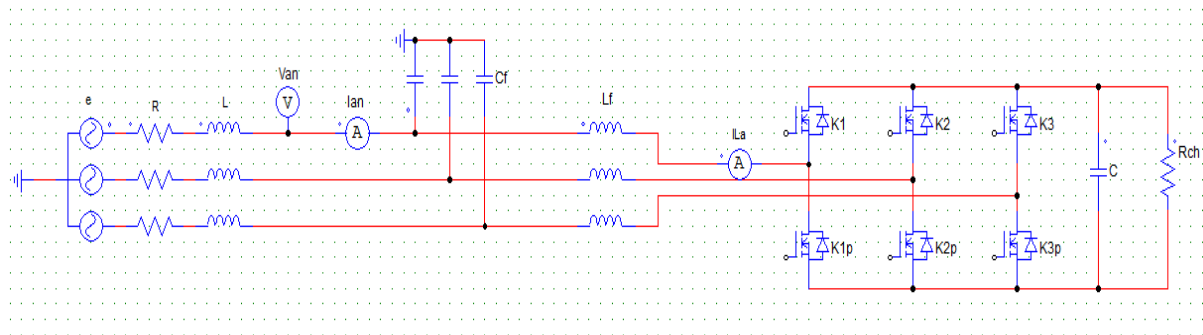


Figure 12

L'Annexe 4 présente les formes d'ondes v_{an} , i_{an} et i_{La} ainsi que leurs analyses spectrales, pour $V_{DC} = 120 \text{ V}$ et $f_P = 20 \text{ kHz}$.

Q57. Justifier l'allure du spectre de i_{La} .

Q58. Expliquer le rôle et l'intérêt des composants C_f et L_f .

Q59. Commenter le choix des valeurs de 48 V pour l'alternateur et 120 V pour la tension continue. Compte tenu de l'application envisagée (alimentation autonome d'un particulier), expliquer si d'autres valeurs peuvent convenir et pourquoi.

L'Annexe 5 présente les formes d'ondes v_{an} , i_{an} et i_{La} ainsi que leurs analyses spectrales, pour $V_{DC} = 150 \text{ V}$ et $f_P = 20 \text{ kHz}$.

Q60. Comparer ces mesures à celles de l'Annexe 4 et conclure.

Q61. En vous aidant des résultats obtenus dans cette partie, expliquer quels problèmes concrets il faudra prendre en compte lors de l'alimentation de l'ensemble alternateur – redresseur MLI par un système éolien.

ANNEXE 1

On se place dans le cas général communément utilisé pour la couche atmosphérique occupée par l'Homme (troposphère) d'une variation de température linéaire avec l'altitude. On peut alors écrire que, en l'absence de tout phénomène météorologique, la température $T(h_1)$ (K) à l'altitude h_1 (m) dépend de la température de référence $T(h_0)$ mesurée à altitude h_0 selon la loi :

$$T(h_1) = T(h_0) - a.(h_1 - h_0)$$

a : gradient de température vertical (positif) en $K.m^{-1}$

On peut alors déterminer la pression atmosphérique $p(h_1)$ (en hPa) à l'altitude h_1 (en l'absence de phénomène météorologique) par la « formule de nivellement barométrique » suivante :

$$p(h_1) = p(h_0) \cdot \left(1 - \frac{a \cdot \Delta h}{T(h_0)}\right)^{\frac{M \cdot g}{R \cdot a}}$$

$M = 0,02896 \text{ kg.mol}^{-1}$	masse molaire moyenne des gaz de l'atmosphère
$g = 9,807 \text{ m.s}^{-2}$	accélération de la pesanteur
$R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$	constante universelle des gaz parfaits
$p(h_0)$ (hPa)	pression atmosphérique à l'altitude de référence h_0

Le gradient de température moyen retenu est habituellement de 0,65 K pour 100 m d'élévation verticale. Dans ce cas, la formule de nivellement barométrique devient :

$$p(h_1) = p(h_0) \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot \Delta h}{T(h_0)}\right)^{5,255}$$

En prenant comme altitude de référence le niveau de la mer et comme état moyen de l'atmosphère celui défini par « l'atmosphère normalisée type OACI », on obtient la pression $p(z)$ en hPa de l'air à l'altitude z (m), ou « formule internationale du nivellement barométrique » :

$$p(z) = 1013,25 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot z}{288,15}\right)^{5,255}$$

avec	$p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$	pour	$h_0 = 0 \text{ m}$
	taux d'humidité		0%
	température en h_0		$15^\circ\text{C} = 288,15 \text{ K}$
	gradient de température		0,65 K pour 100 m

On peut ainsi calculer la pression à l'altitude h_1 sans connaître la température ni le gradient de température vertical. La précision du résultat est toutefois limitée puisqu'on ne tient pas compte de l'état réel de l'atmosphère.

On peut établir que la variation de masse volumique ρ (kg.m^{-3}) de l'air en fonction de l'humidité relative φ , de la température θ ($^\circ\text{C}$) et de la pression atmosphérique $p(z)$ (Pa) peut s'écrire (pour une température comprise entre -30°C et $+70^\circ\text{C}$) :

$$\rho(\varphi, \theta, p(z)) = \frac{1}{287,06 \cdot (\theta + 273,15)} \left(p(z) - 230,617 \cdot \varphi \cdot \exp \left[\frac{17,5043 \cdot \theta}{241,2 + \theta} \right] \right)$$

ANNEXE 2

Relevés météorologiques moyens pour la journée du 10 février et du 10 août :

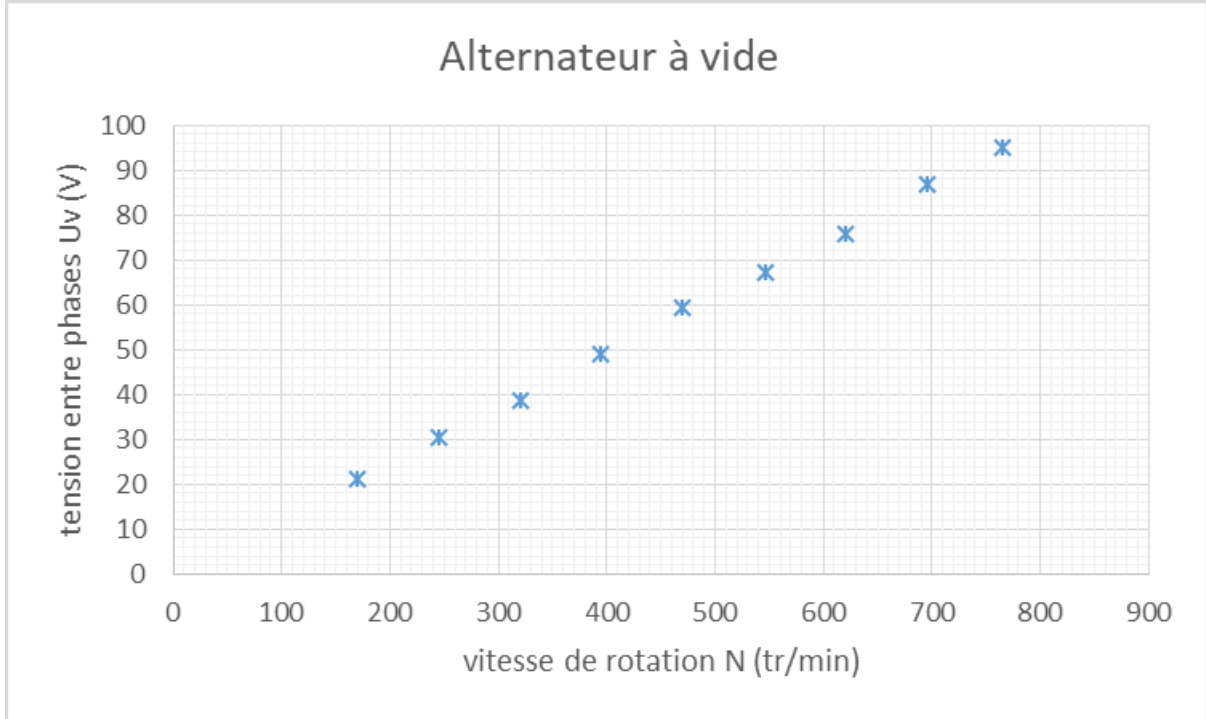
10 février

10 août

heure	θ (°)	humidité (%)	pression (hPa)	vent (km/h)	soleil (W/m ²)	heure	θ (°C)	humidité (%)	pression (hPa)	vent (km/h)	soleil (W/m ²)
1:00	6,9	76	1013,2	18	0	1:00	16,7	81	1018,5	7	0
2:00	7,3	75	1012,3	14	0	2:00	21,9	96	1012	7	0
3:00	6,4	78	1010,8	11	0	3:00	21,8	96	1012,3	4	0
4:00	4,9	86	1009,3	7	0	4:00	21,6	96	1012,6	7	0
5:00	8,2	70	1007,5	22	0	5:00	21,7	93	1013,4	7	0
6:00	8,4	69	1006,5	18	0	6:00	20,8	85	1014	4	0
7:00	9	66	1005,3	18	0	7:00	20,1	90	1014,5	14	0
8:00	9,8	63	1003,9	22	0	8:00	20,1	90	1015,2	14	25
9:00	11	58	1003,2	25	22	9:00	19,8	87	1016,1	14	106
10:00	11	57	1002	25	56	10:00	19,7	82	1016,9	18	150
11:00	13	55	1001	29	78	11:00	22	72	1017,2	18	419
12:00	13	55	1000,1	32	72	12:00	24,2	57	1016,6	22	753
13:00	12	69	999,3	36	67	13:00	25,2	56	1016,4	25	886
14:00	11	70	998,3	32	72	14:00	25,8	54	1016	22	870
15:00	10	78	998,1	32	97	15:00	27,2	44	1016	22	686
16:00	7,6	88	1000,2	18	14	16:00	26,8	38	1016	29	578
17:00	8,7	72	1000,8	29	53	17:00	28,2	34	1015,8	25	556
18:00	6,7	73	1002,6	40	6	18:00	27,2	35	1015,9	25	478
19:00	7,3	64	1003,9	40	0	19:00	27,1	37	1016	22	294
20:00	6,5	70	1005,4	32	0	20:00	25,9	39	1016,6	18	142
21:00	5,9	77	1006,4	29	0	21:00	22,1	54	1017,3	11	22
22:00	6,3	76	1007,4	36	0	22:00	20,8	61	1017,9	7	0
23:00	5,4	81	1008,4	14	0	23:00	18,9	73	1018,1	7	0
0:00	5,2	81	1009,7	18	0	0:00	17,7	76	1018,4	7	0

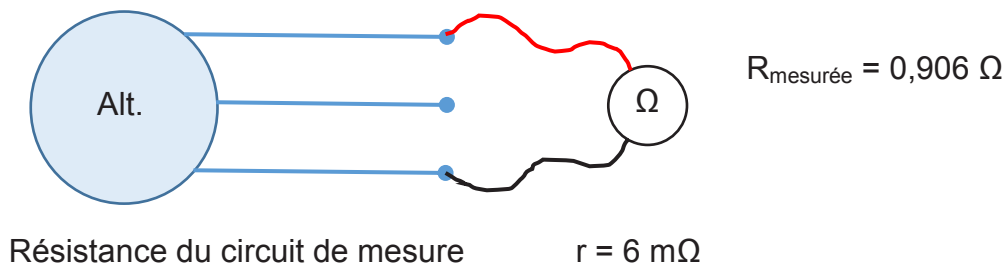
ANNEXE 3

MESURES A VIDE



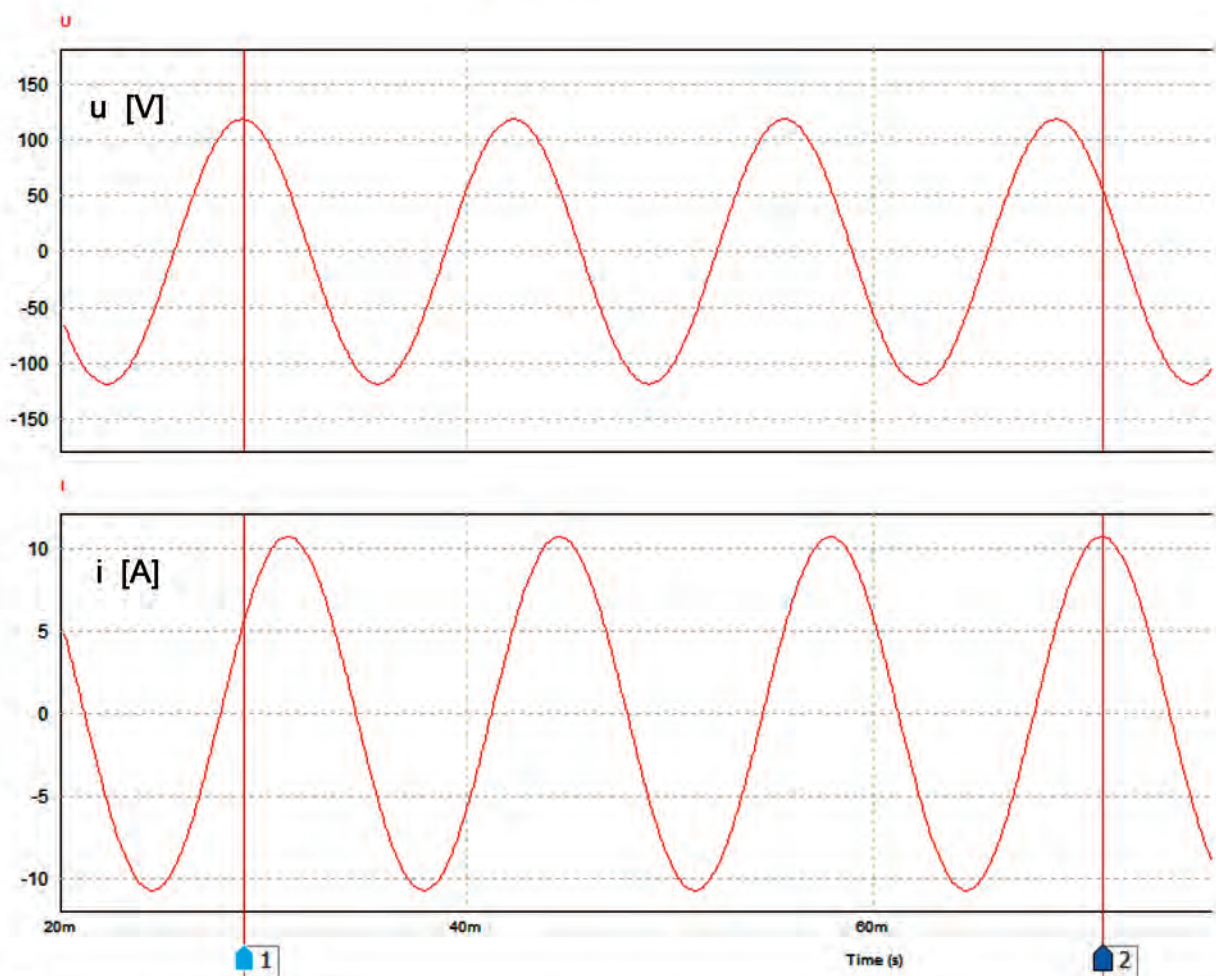
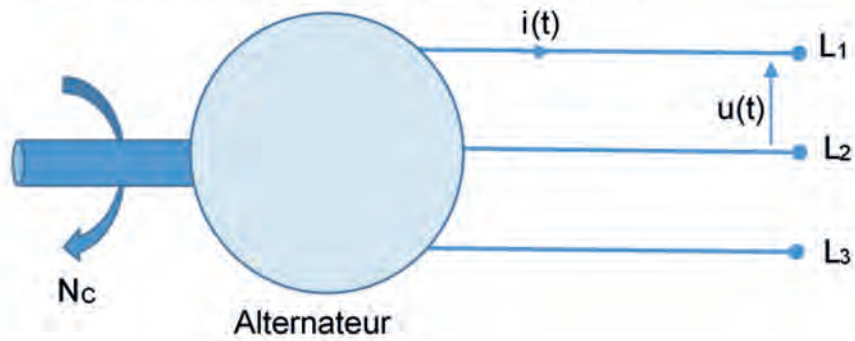
MESURE DES RESISTANCES STATORIQUES

La mesure des résistances a été réalisée à chaud avec un milli ohmmètre sur le stator de l'alternateur qui est livré couplé en étoile (le couplage n'est pas accessible)



MESURES EN CHARGE

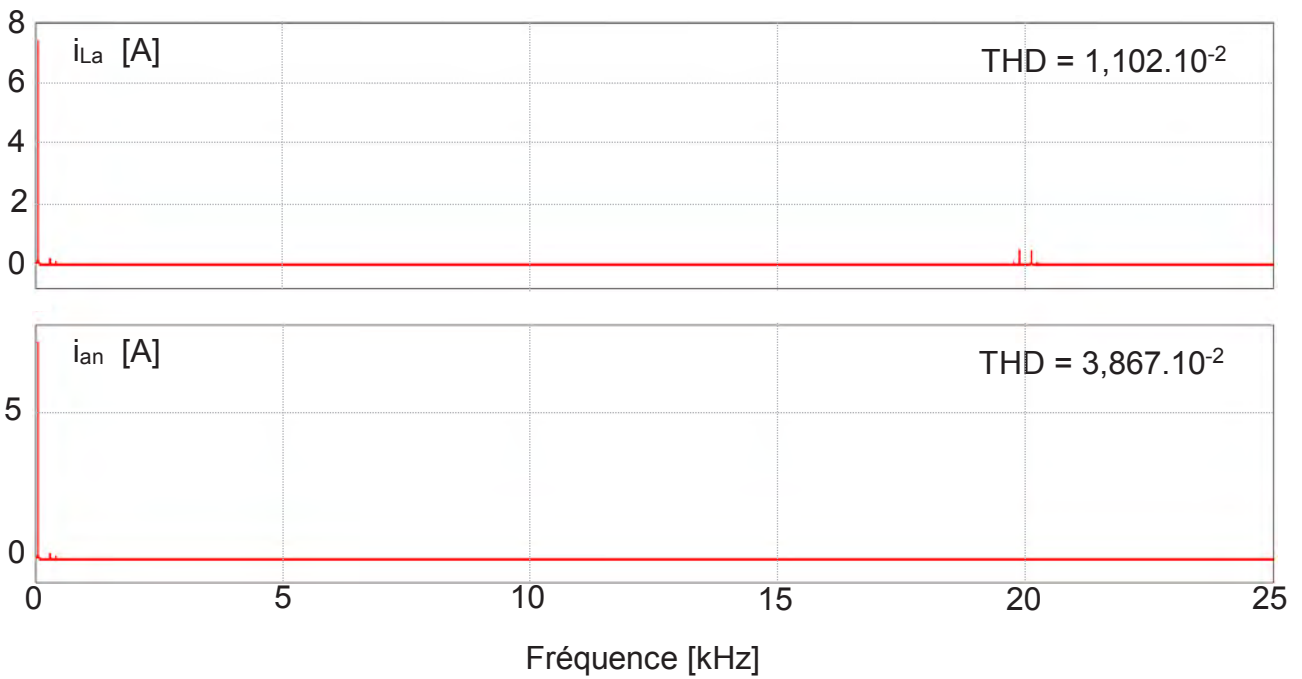
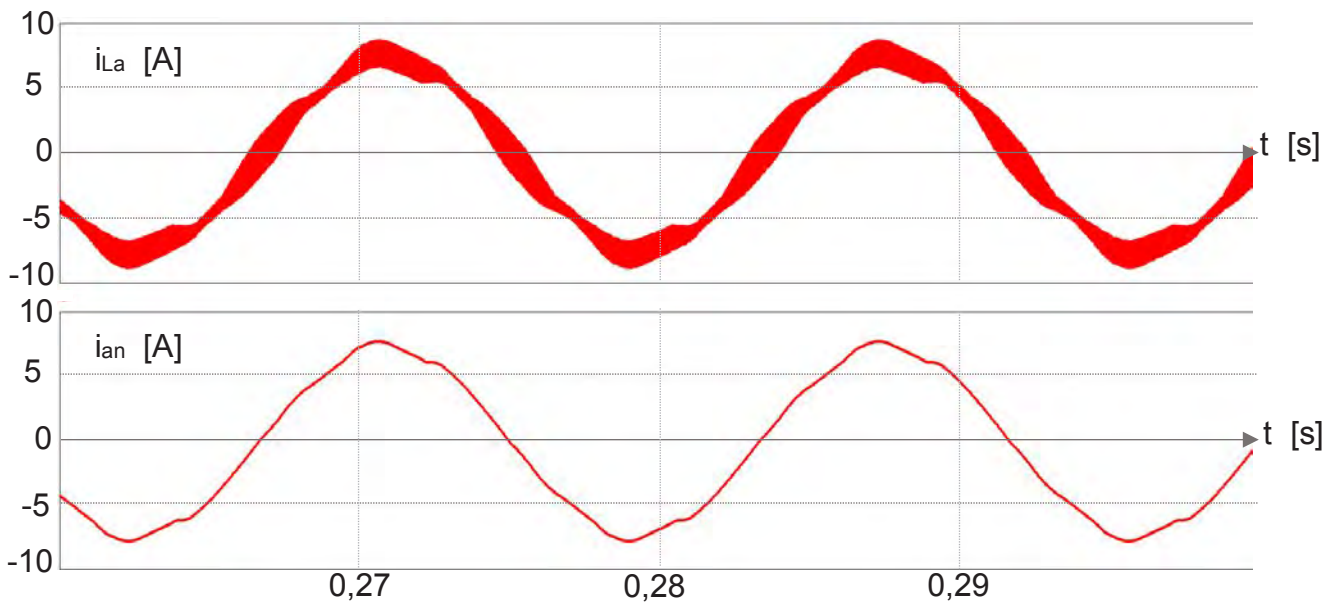
L'alternateur est entraîné en régime permanent par un moteur extérieur à une vitesse constante $N_c = 750$ tr/min et débite dans une charge inductive. On relève à l'oscilloscope la tension entre phases $u(t)$ et le courant de ligne $i(t)$.

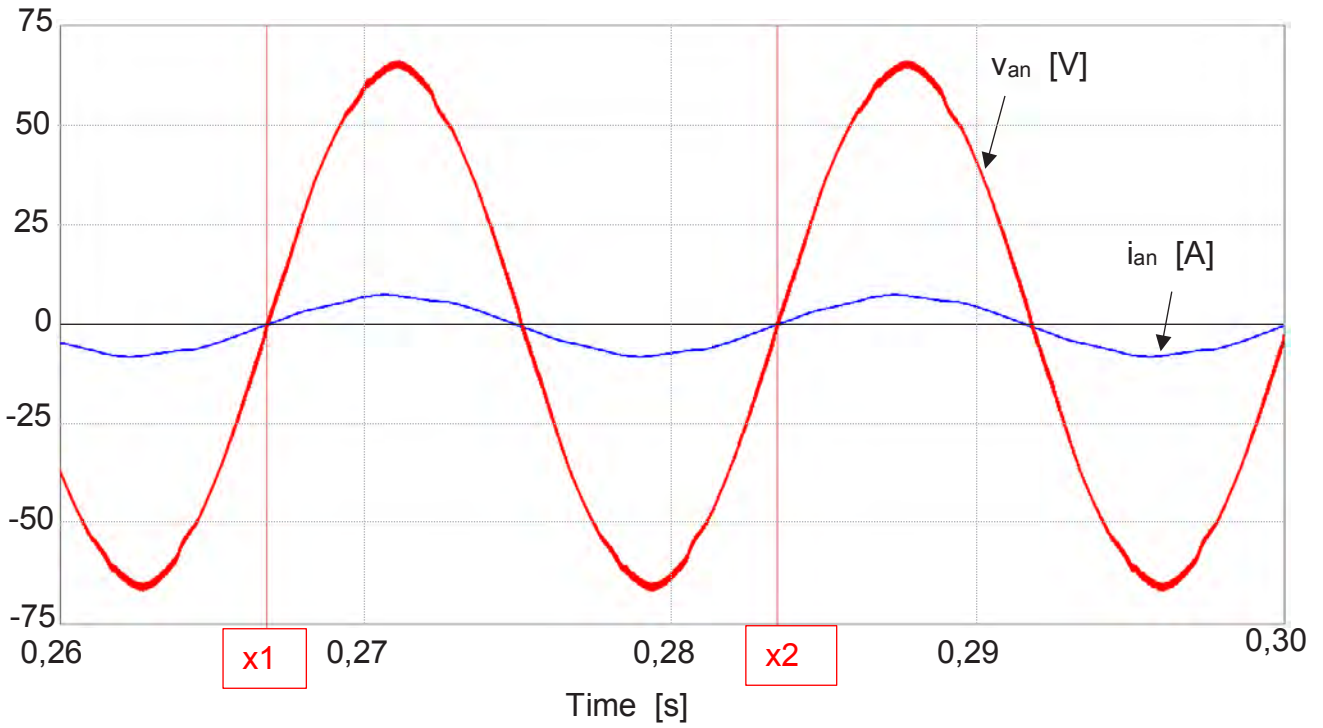


	x1	x2	Δ
Time	2.9003690e-002	7.1217712e-002	4.2214022e-002
U	1.1840621e+002	5.6564830e+001	-6.1841377e+001
I	5.4499788e+000	1.0661688e+001	5.2117097e+000

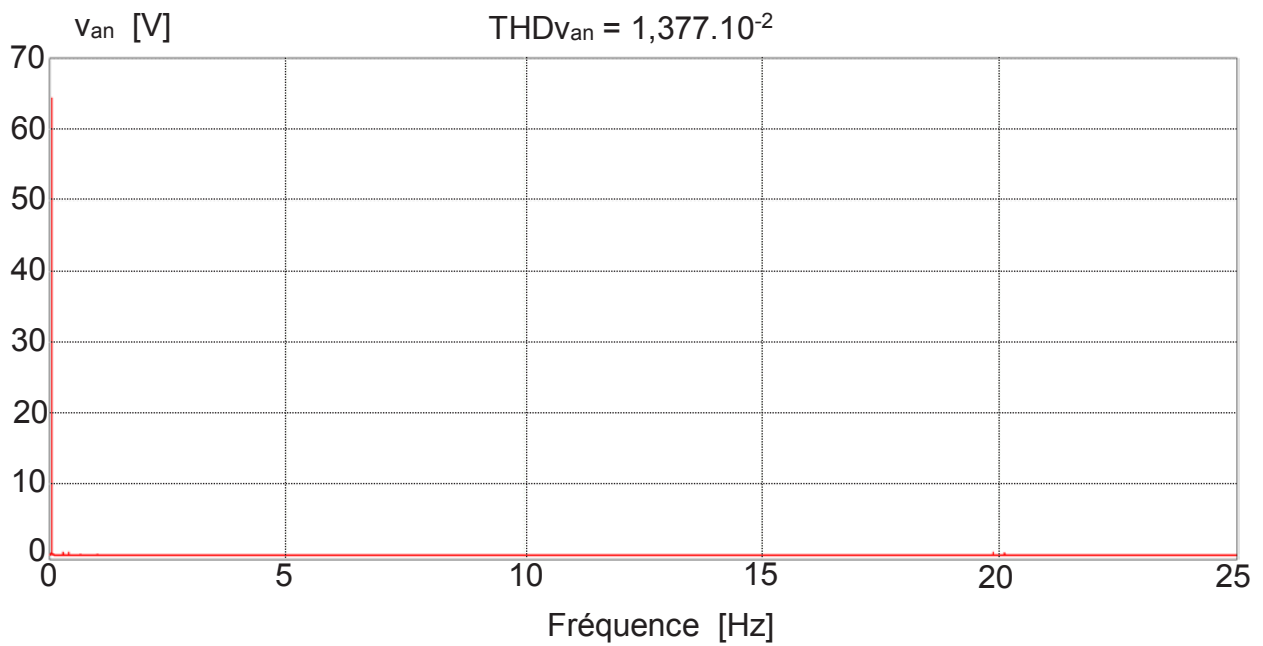
ANNEXE 4

$V_{DC} = 120 \text{ V}$, $f = 60 \text{ Hz}$ et $f_P = 20 \text{ kHz}$



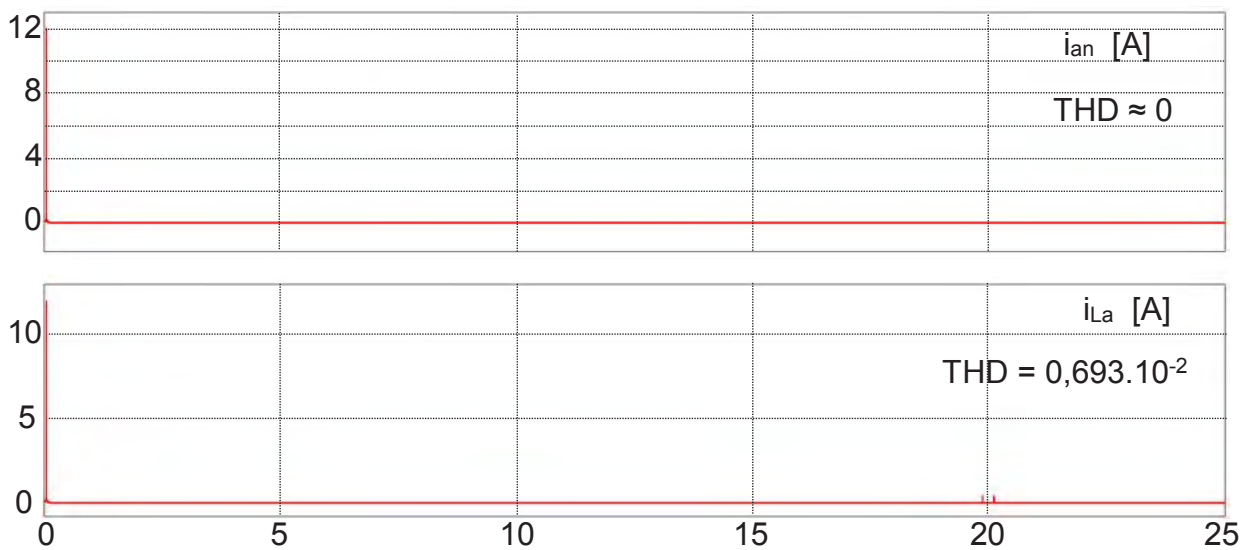
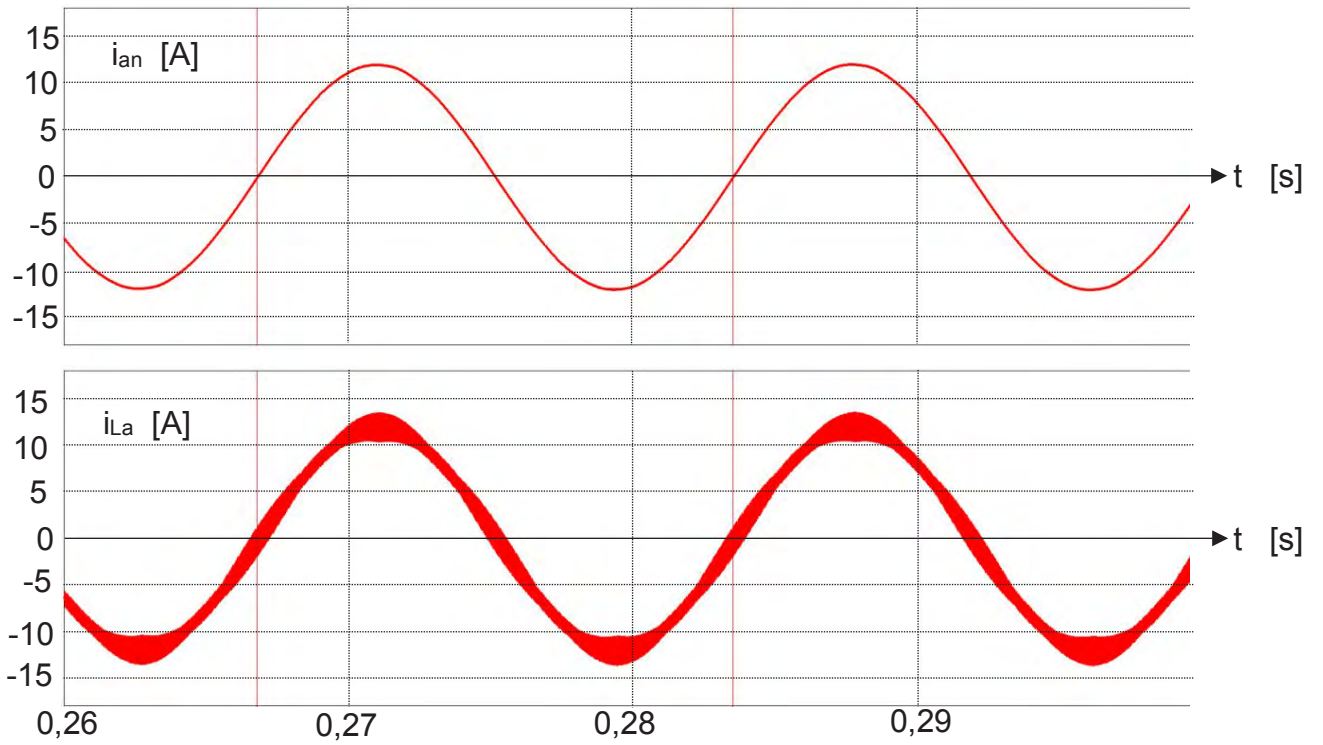


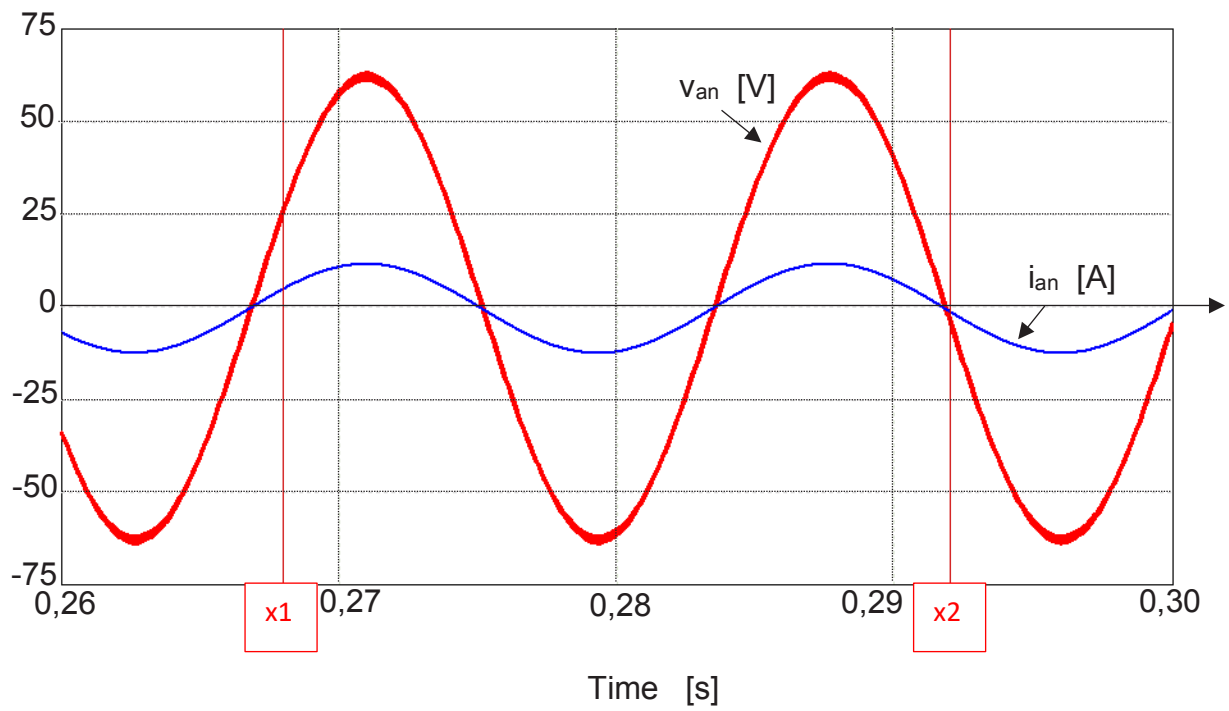
	x1	x2	Δ	RMS	Power Factor
Time [s]	2,667651e-001	2,834482e-001	1,668308e-002		
V_{an} [V]	6,359452e-001	-4,486366e-001	-1,084581e+000	4,55011e+001	9,985932e-001
I_{an} [A]	3,185805e-001	3,507287e-001	3,214820e-002	5,274659e+000	



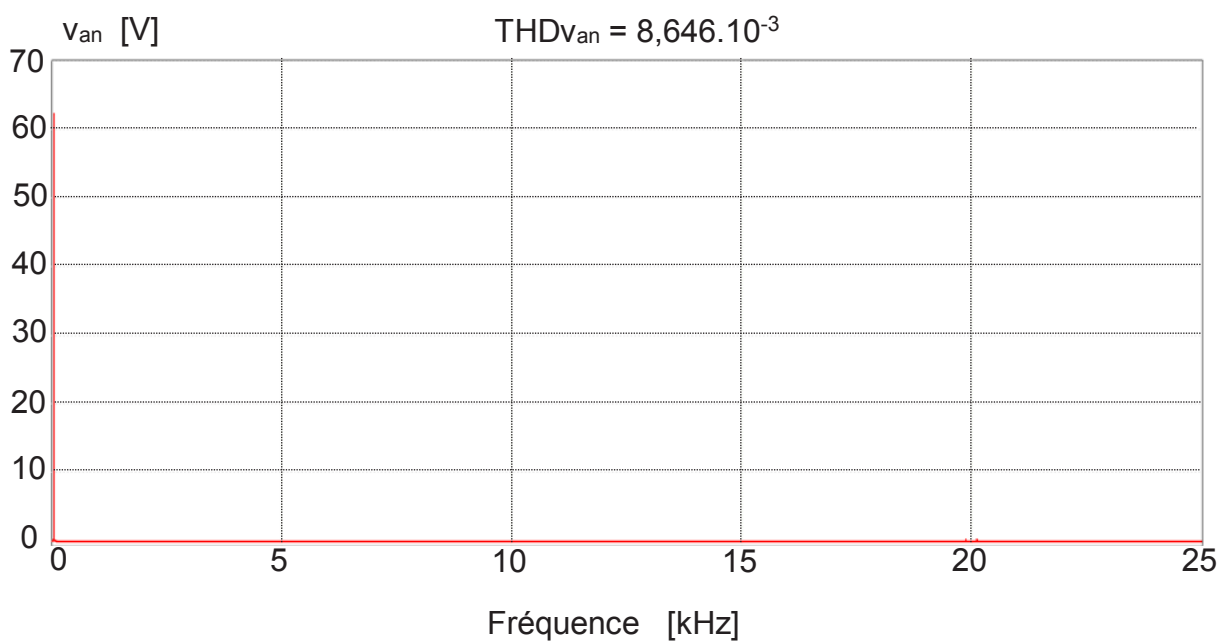
ANNEXE 5

$V_{DC} = 150 \text{ V}$, $f = 60 \text{ Hz}$ et $f_P = 20 \text{ kHz}$





	x1	x2	Δ	RMS	Power Factor
Time [s]	2,680002e-001	2,9200005e-001	2,3999850e-002		
V_{an} [V]	2,58766e+001	-4,223930e+000	-3,010053e+001	4,482656e+001	9,997733e-001
I_{an} [A]	5,25743e+000	-9,244642e-001	-6,181902e+000	8,654054e+000	



Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Prénom(s) :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Numéro
Inscription :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Né(e) le :

--	--

 /

--	--

 /

--	--	--	--

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : Section/Specialité/Série :

Epreuve : Matière : Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

EAE SIE 3

Documents réponses 1, 2 et 3

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT REPONSE 1

Q3.

On propose d'évaluer les situations suivantes :

Situation	Altitude z (m)	Pression $p(z)$ (hPa)	Température θ ($^{\circ}\text{C}$)	Humidité relative φ	Masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	1500		12,5	0,74	
2	0		25	0,37	
3	0		25	0,74	
4	1500		25	0,74	

DOCUMENT RÉPONSE 2

Q4.

Données relevées le 25/09 à 16h00 UTC

Lieu	Altitude (m)	Température (°C)	Humidité relative	Pression atmosphérique (hPa)	Vent moyen (km/h)	Rayonnement solaire (W/m ²)	Masse volumique de l'air ρ (kg/m ³)	P th (W)
Sommet alpin	1300	9,7	0,93	1011,2	6,4	114		
Bord de Méditerranée	4	27,4	0,35	1006,4	34,2	289		
Bord d'Atlantique	5	16,1	0,96	1009,9	20,2	49		
Plaine	161	15,7	0,94	1011,1	15,5	56		

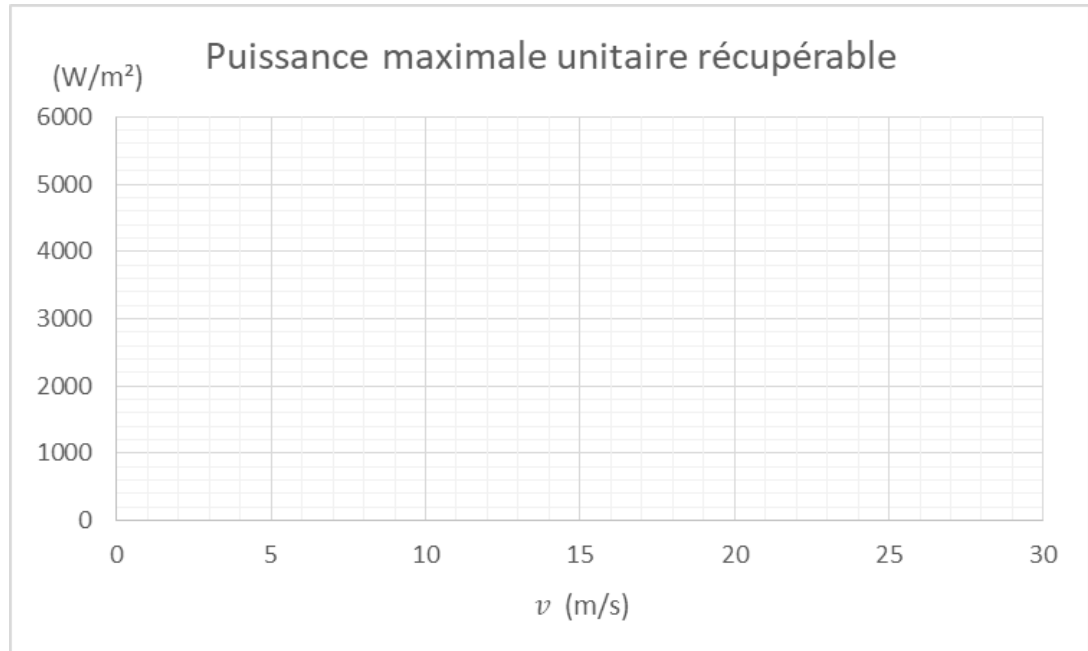
Tournez la page S.V.P.

DOCUMENT RÉPONSE 3

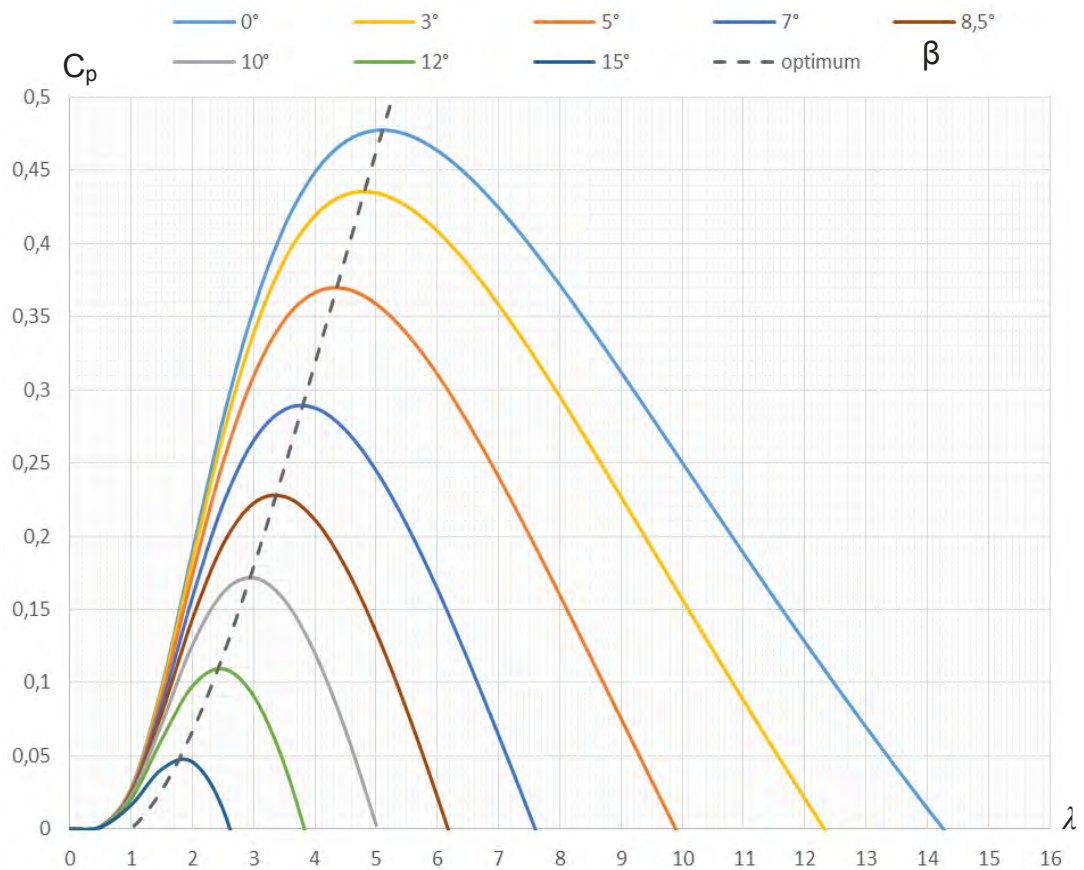
Evolution de la puissance maximale récupérable pour 1 m² de surface de l'aérogénérateur, en fonction de la vitesse v du vent incident.

On utilisera les conditions moyennes définies par « l'atmosphère normalisée type OACI » (voir Annexe 1).

Q7.



Q11.



Nom de famille :

(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Prénom(s) :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Numéro
Inscription :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Né(e) le :

		/			/														
--	--	---	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : Section/S spécialité/Série :

Epreuve : Matière : Session :

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

EAE SIE 3

Document réponse

4

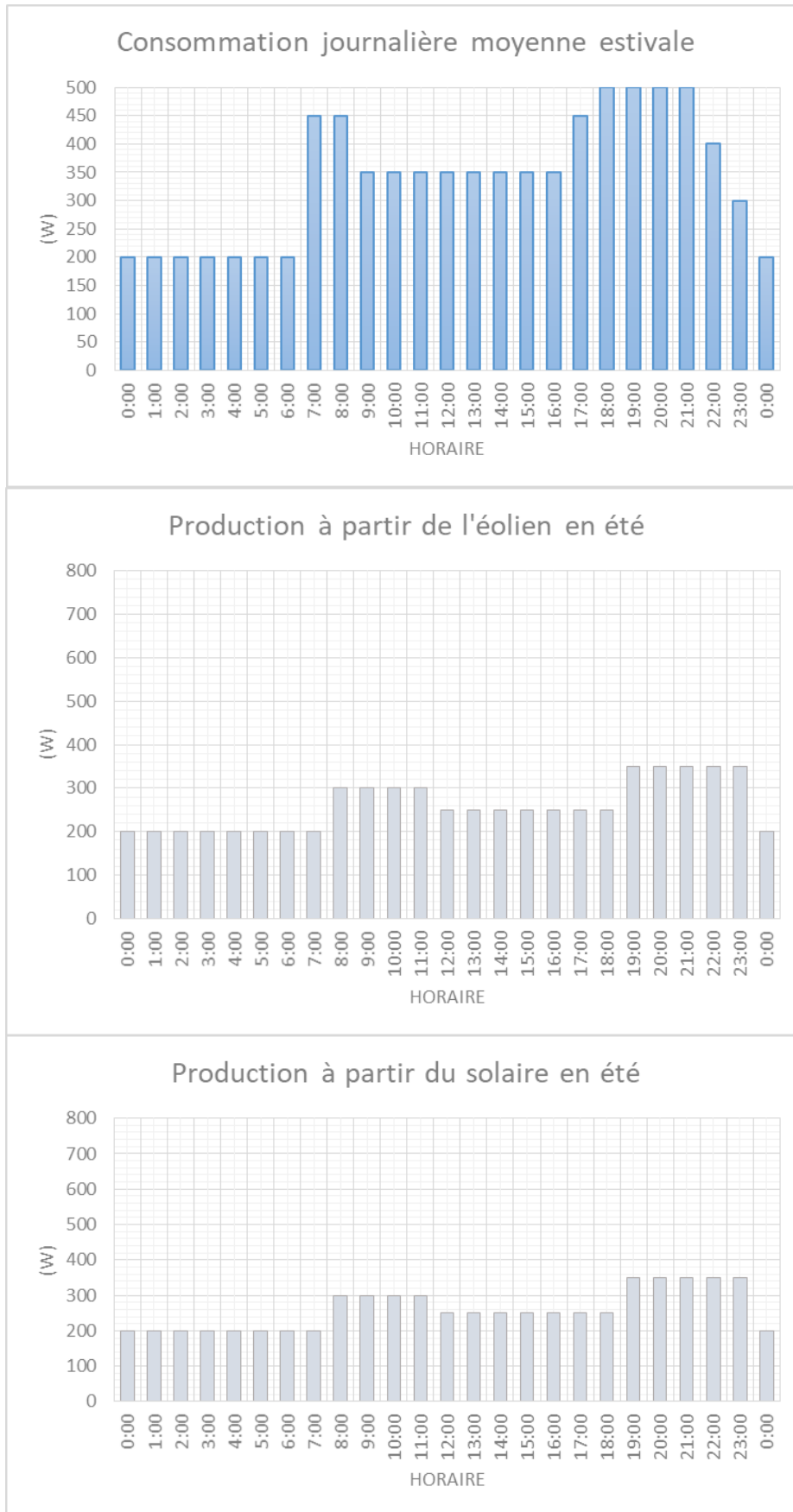
**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE 4

Q14.

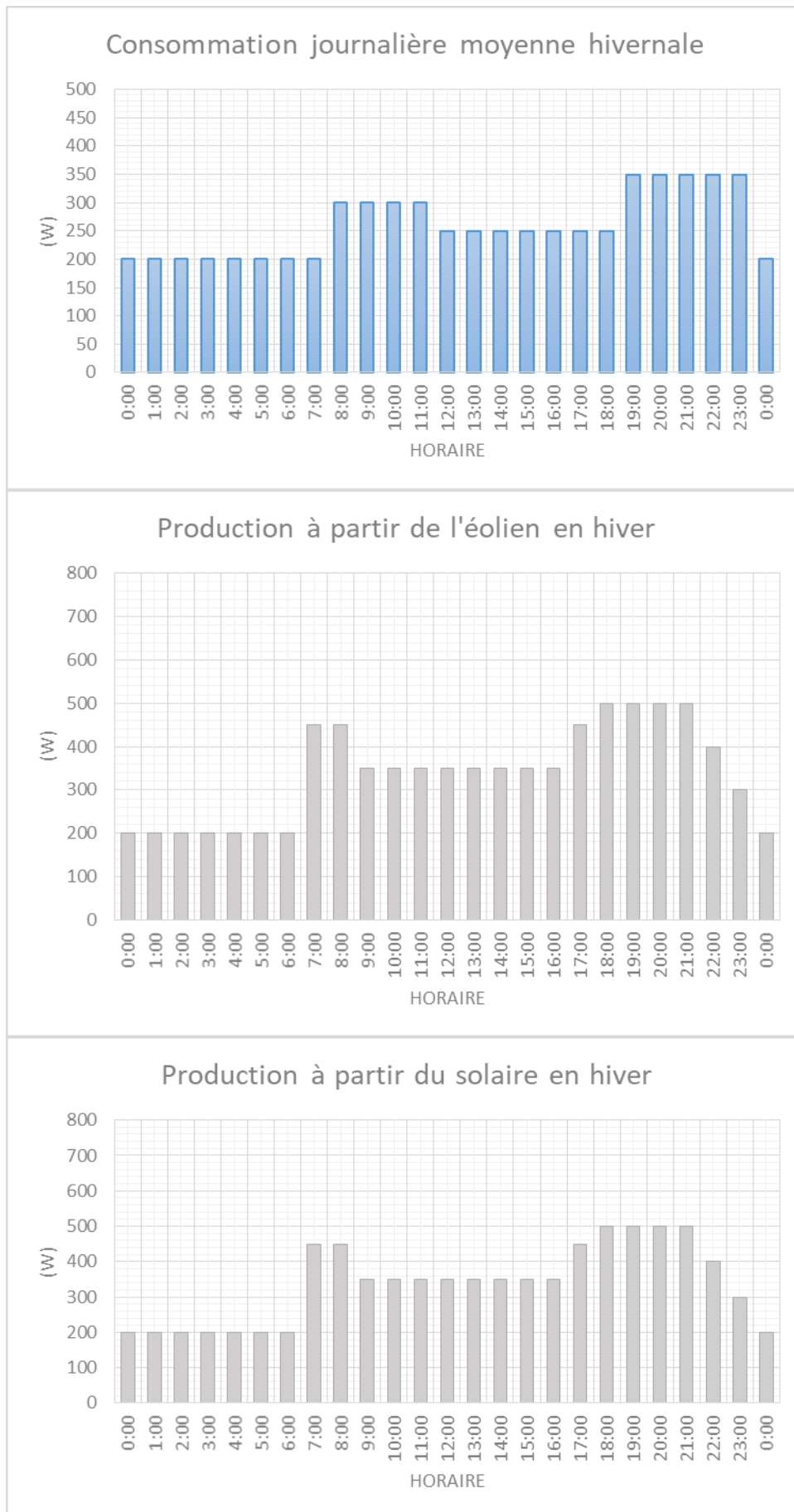
Été



DOCUMENT RÉPONSE 4

Q14-suite

Hiver



Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Prénom(s) :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Numéro
Inscription :**

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Né(e) le :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : **Section/Spécialité/Série :**

Epreuve : **Matière :** **Session :**

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur **CHAQUE** feuille officielle, la zone d'identification en **MAJUSCULES**.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroté chaque **PAGE** (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

EAE SIE 3

Document réponse

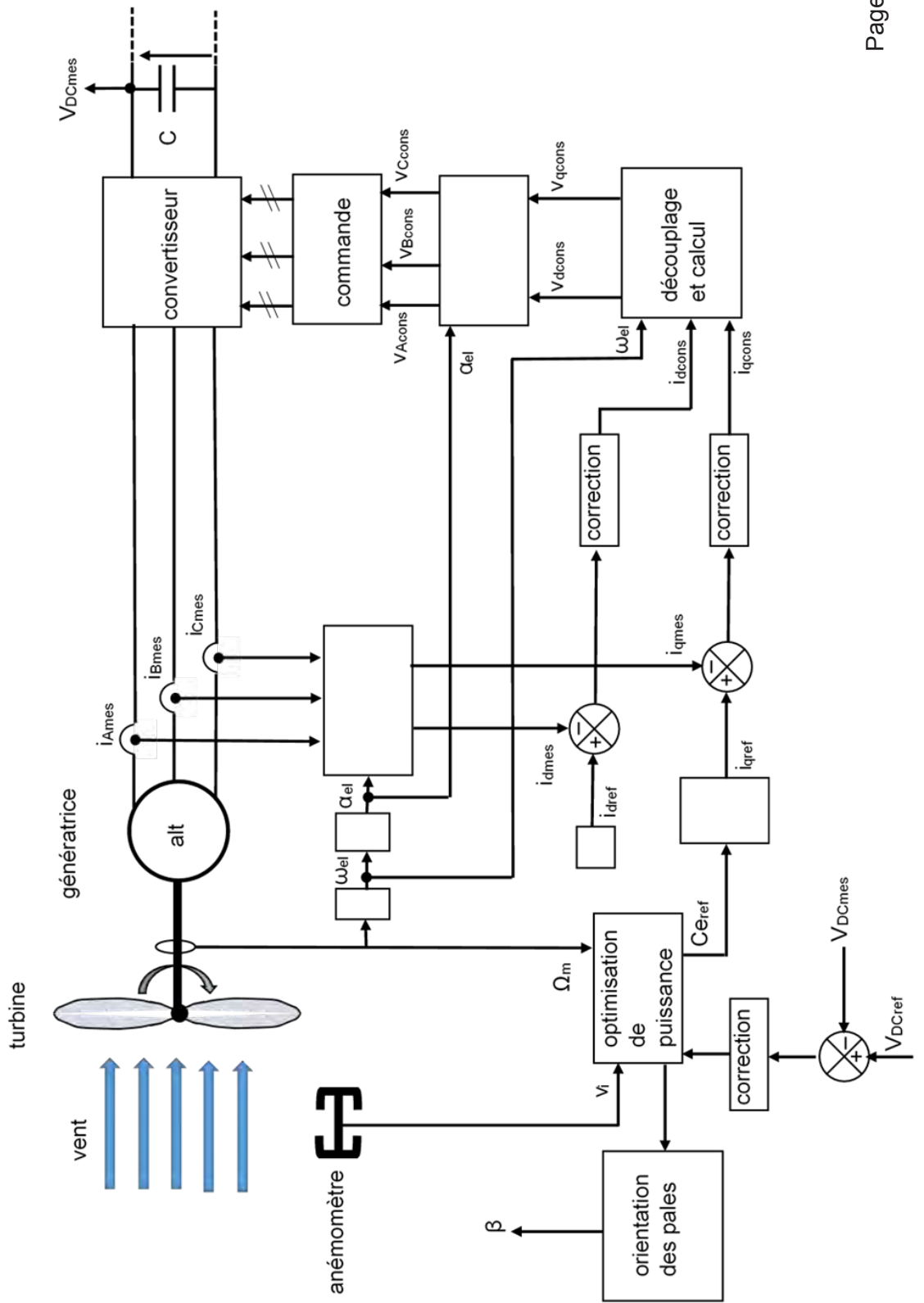
5

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Q35.

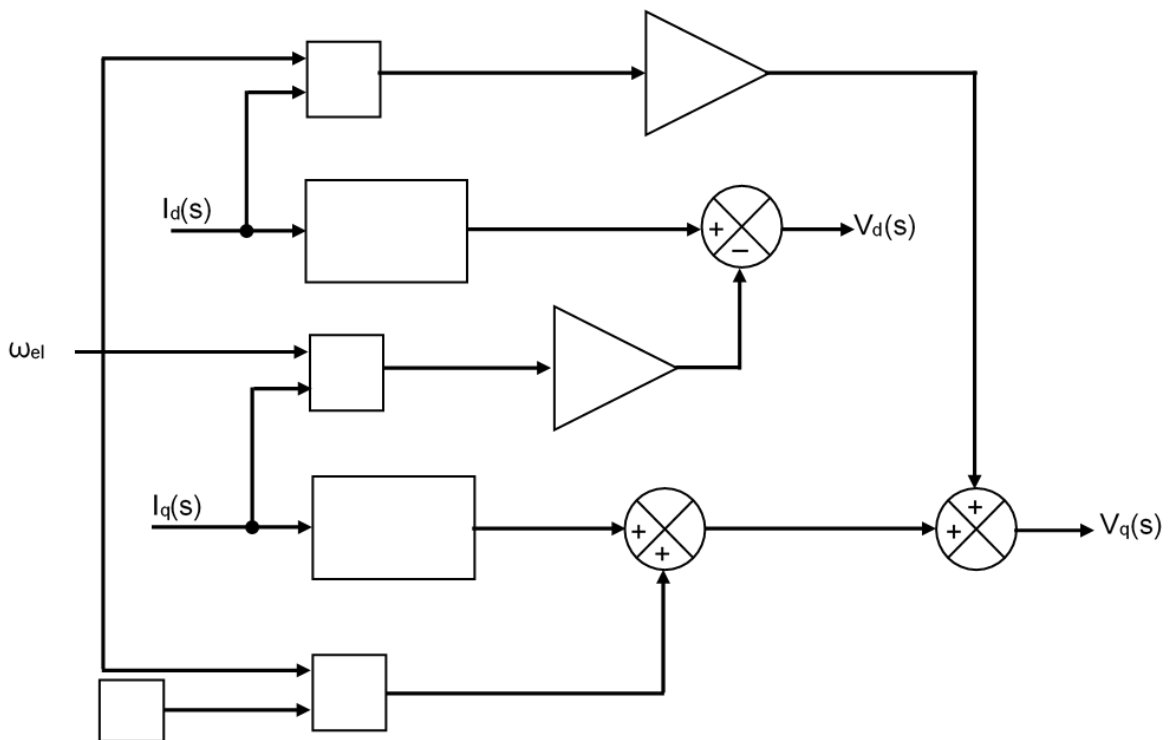
Schéma 1



DOCUMENT RÉPONSE 5

Q35.

Schéma 2



Nom de famille :

(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Prénom(s) :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Numéro
Inscription :**

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Né(e) le :

						/						/					
--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

(Remplir cette partie à l'aide de la notice)

Concours / Examen : **Section/Spécialité/Série :**

Epreuve : **Matière :** **Session :**

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuille officielle, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Numéroter chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) et placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuille officielle. Ne joindre aucun brouillon.

EAE SIE 3

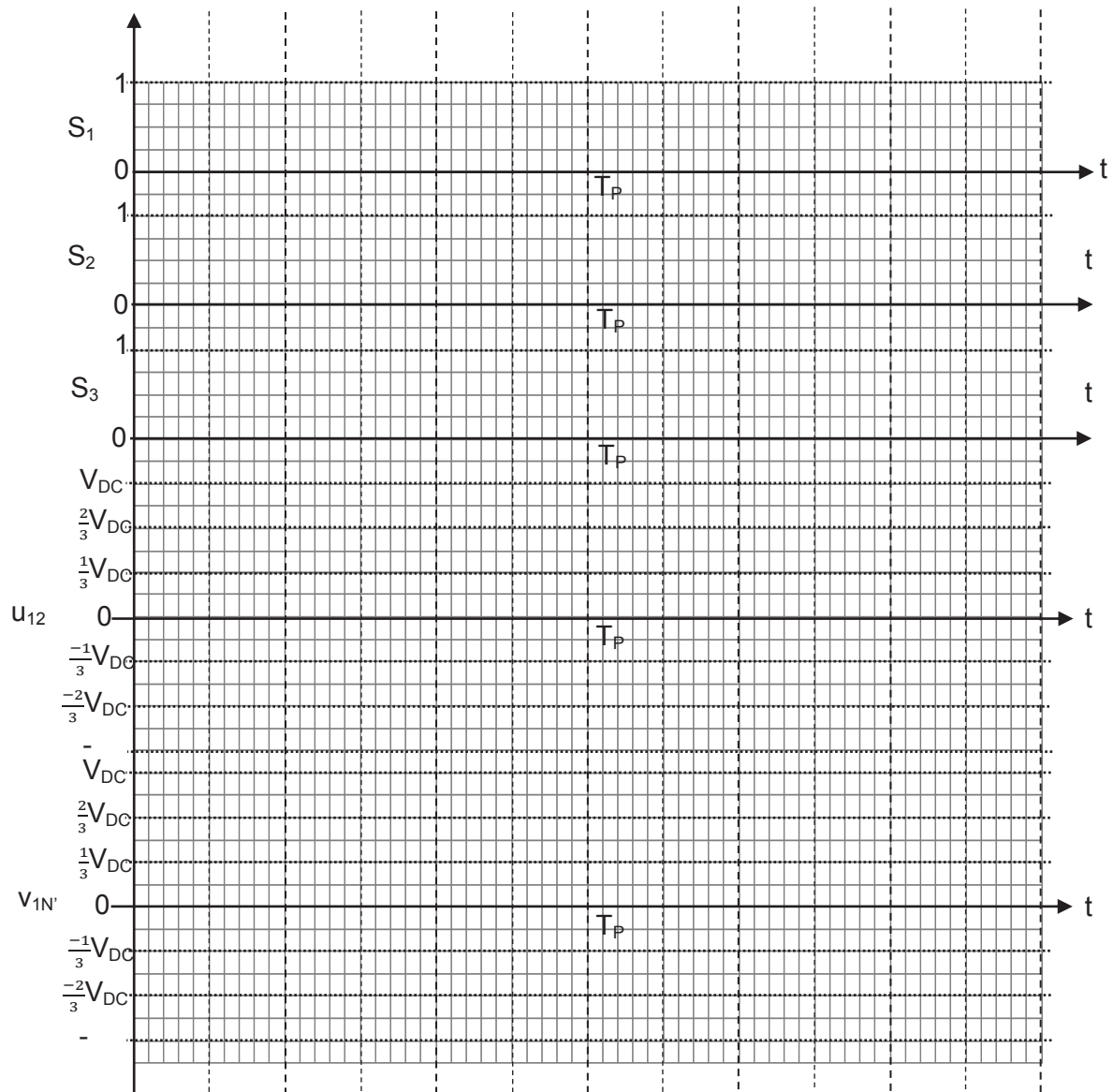
Documents réponses 6, 7 et 8

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

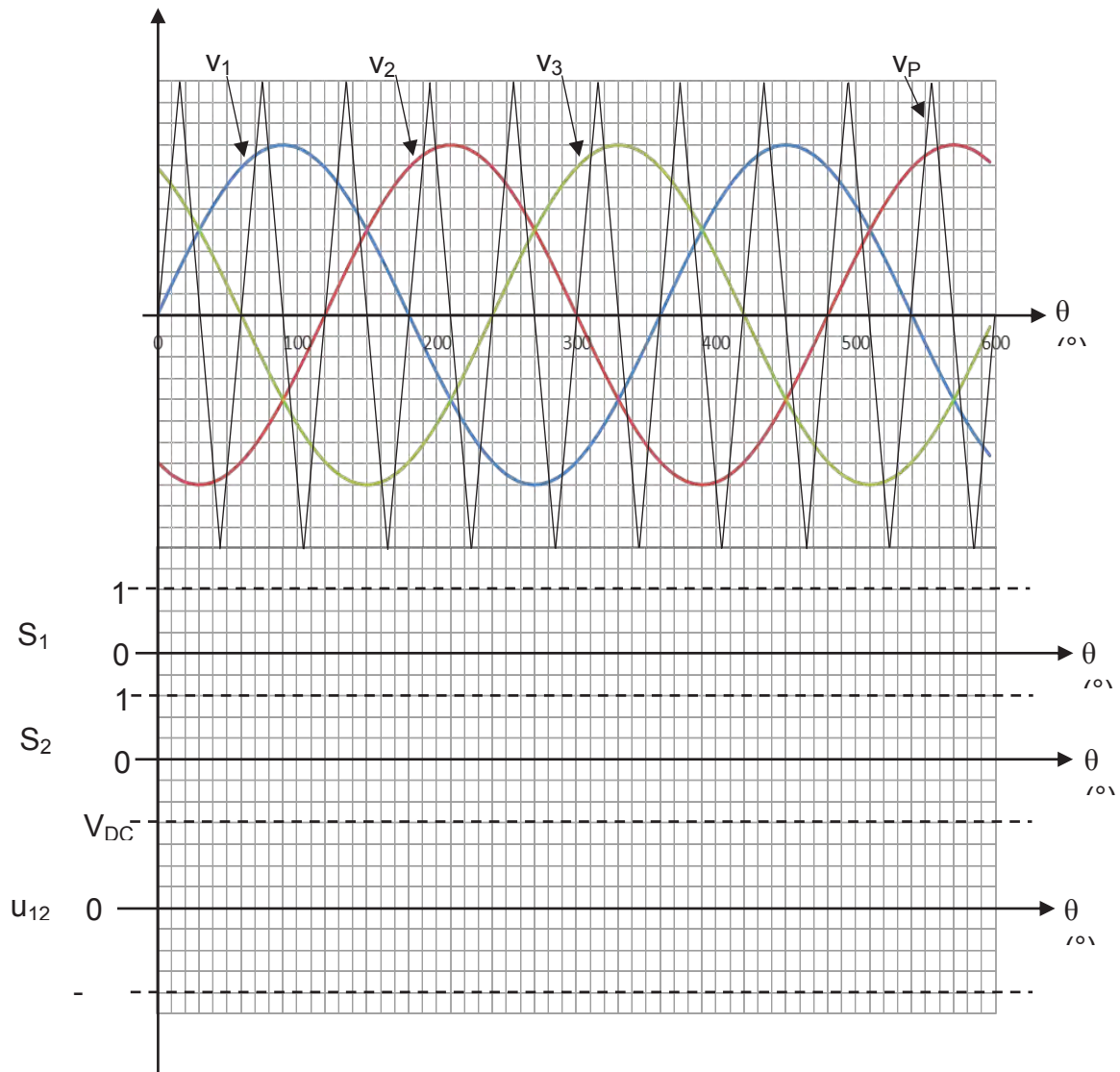
DOCUMENT RÉPONSE 6

Q40. Q42. Q43.



DOCUMENT RÉPONSE 7

Q46.



DOCUMENT RÉPONSE 8

Q56.

