

ETUDE D'UNE EOLIENNE

Recommandations générales

L'épreuve se compose de plusieurs parties indépendantes. A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. *Le candidat est donc invité d'une part à lire entièrement l'énoncé avant de commencer à composer, d'autre part à bien répartir le temps de composition entre les différentes parties.*

Les parties A, B, C et D doivent être rédigées sur des copies séparées en respectant scrupuleusement la numérotation des questions et les notations de l'énoncé. Une rédaction soignée, une écriture lisible et des résultats encadrés seront appréciés par les correcteurs.

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 du système

L'alimentation en électricité d'un site insulaire isolé se fait traditionnellement par des groupes électrogènes interconnectés. Pour faire face à un accroissement de la demande, il est envisagé d'installer une éolienne d'une puissance nominale de 300 kW. Cette machine, présentée à la figure A1, est un modèle largement répandu¹, elle est dotée d'un rotor à trois pales de 28 m de diamètre tournant à une vitesse voisine de 43 tr/mn. Elle est capable de fournir sa puissance nominale lorsque la vitesse du vent est comprise entre 14 m/s et 22 m/s. Cette puissance est réduite pour des vitesses de vent inférieures.

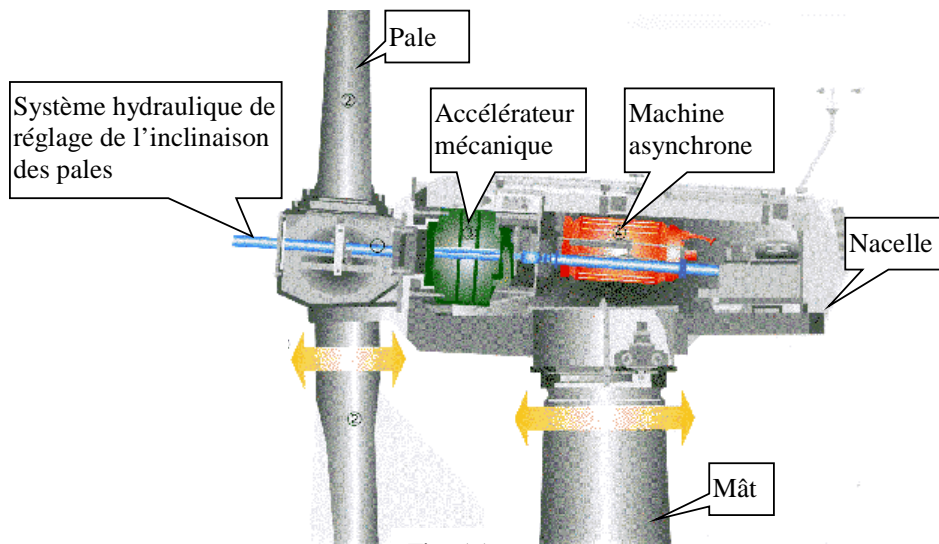


Fig. A1

La nacelle de l'éolienne est montée au sommet d'un mât de 30 m, elle est équipée d'un accélérateur mécanique à engrenages et d'une machine asynchrone tétrapolaire directement connectée au réseau 400 V/50Hz.

Les pales du rotor sont inclinables de façon à adapter automatiquement les caractéristiques mécaniques de l'éolienne à la vitesse du vent. Le système de régulation permet de limiter la puissance mécanique reçue par le rotor à une valeur proche de la puissance nominale de

¹ Ce modèle équipe la centrale éolienne de Dunkerque

l'éolienne lorsque la vitesse du vent varie. En cas de tempête, les pales sont mises en drapeau et le rotor est maintenu à l'arrêt par un frein mécanique.

Un second système de régulation assure automatiquement l'orientation de la nacelle face au vent.

Le sujet est découpé en quatre parties principales. La partie A est consacrée à l'étude de la machine asynchrone lorsqu'elle est connectée à un réseau infiniment puissant. Après avoir effectué un bilan des puissances et des pertes, l'étude porte sur la détermination des paramètres du schéma équivalent monophasé à partir des caractéristiques générales de la machine. Cette première partie se termine par une analyse critique du modèle obtenu et par son application au cas de l'éolienne.

La partie B envisage le fonctionnement autonome de l'éolienne lorsque la génératrice asynchrone est connectée à un onduleur triphasé qui remplace le réseau. L'onduleur est d'abord étudié dans un cadre assez général puis dans le cadre particulier du problème. L'étude de l'influence des tensions harmoniques sur la machine asynchrone est ensuite proposée. La partie B se termine par l'étude du fonctionnement en MLI de cet onduleur.

La partie C est consacrée à l'analyse de l'influence de l'éolienne sur le réseau auquel elle est connectée lorsque celui-ci n'est plus infiniment puissant. Une méthode expérimentale est d'abord proposée pour modéliser le réseau. Le modèle obtenu est ensuite utilisé pour déterminer les variations de tension provoquées par la présence de l'éolienne.

La partie D traite du dimensionnement d'une machine asynchrone possédant un grand nombre de pôles capable de fonctionner directement à la vitesse de l'éolienne.

Notations utilisées

- lettre minuscule: valeur instantanée
- lettre minuscule soulignée : vecteur espace
- lettre majuscule soulignée: grandeur complexe (tension, courant, impédance)
- lettre majuscule: valeur constante ou valeur efficace ou module d'une grandeur complexe ($V=|V|$).
- la notation $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de la variable temporelle x

Liste des principaux symboles

- N_s, Ω_s : vitesse de synchronisme exprimée respectivement en tr/mn et en rd/s
- N, Ω : vitesse de l'arbre de la machine asynchrone exprimée respectivement en tr/mn et en rd/s
- N_L, Ω_L : vitesse de rotation de l'arbre lent de l'éolienne respectivement en tr/mn et en rd/s
- P_T : puissance transmise du stator au rotor ou inversement
- P_f, P_j, P_m : pertes fer, joules et mécaniques de la machine asynchrone
- C, C_m, C_E : couple, couple des pertes mécaniques, couple électromagnétique
- C_{EN}, C_{EM}, C_{ED} : couple électromagnétique nominal, couple électromagnétique maximal, couple électromagnétique de démarrage
- P_a, C_a : pertes de l'accélérateur mécanique et couple correspondant.

Caractéristiques de la machine asynchrone

Ces caractéristiques sont définies par le constructeur lorsque la machine asynchrone fonctionne en moteur.

- 4 pôles, rotor à cage
- alimentation : 230 / 400 V - 50 Hz
- puissance mécanique nominale : $P_{UN}=300$ kW
- vitesse nominale : $N_N=1485$ tr/mn
- rendement nominal : $\eta_N=96\%$
- facteur de puissance nominal : $\cos \varphi_N=0,84$

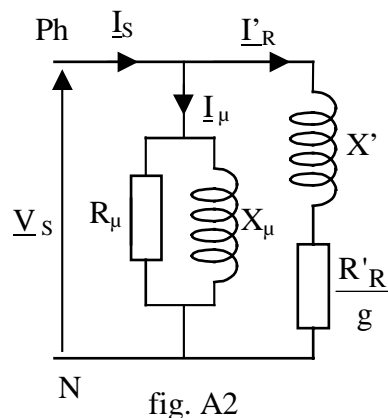
- couple électromagnétique maximal : $C_{EM}=2C_{EN}$
- couple électromagnétique de démarrage : $C_{ED}=0,8C_{EN}$
- courant de démarrage : $I_{SD}=4I_{SN}$ (en démarrage direct sous tension nominale)

Hypothèses simplificatrices – conventions de signe

Pour simplifier l'étude analytique, les résistances des enroulements statoriques seront négligées. Les pertes mécaniques seront supposées constantes et égales à $P_m=1kW$. Les pertes mécaniques de l'accélérateur seront aussi supposées constantes et égales à $P_a=6,3 kW$. Le couple correspondant à ces pertes (C_a) sera ramené à l'arbre de sortie de l'accélérateur mécanique qui tourne à la vitesse de la machine asynchrone (Ω).

Toutes les puissances seront comptées positivement lorsqu'elles correspondent à de l'énergie prise sur le réseau ce qui correspond aux notations habituelles lorsque la machine asynchrone fonctionne en moteur. Ainsi, lorsque l'éolienne fournit de l'énergie au réseau, la puissance correspondante sera négative.

Pour modéliser la machine asynchrone, on utilise le schéma équivalent monophasé. On suppose que l'hypothèse de Kapp est applicable, ce qui revient à négliger la chute de tension provoquée par le courant magnétisant dans la réactance de fuites du stator. Dans ces conditions, le schéma de la figure A2 représente une phase du stator, les deux autres phases sont supposées identiques. Les sens conventionnels des tensions et des courants sont précisés sur cette figure. X' est la réactance totale de fuites vue du stator, R'_R la résistance du rotor ramenée au stator, R_μ la résistance représentant les pertes fer, X_μ la réactance magnétisante du stator et g le glissement.



Partie A : étude du fonctionnement lorsque le réseau est très puissant

Dans cette partie la tension et la fréquence sont imposées par le réseau. L'éolienne fournit un complément de puissance au réseau dont l'impédance interne est supposée nulle.

Pour les parties A1 et A2, toutes les valeurs numériques doivent être calculées avec une précision suffisante pour que les résultats finaux soient connus avec trois chiffres significatifs. Toutes les applications numériques seront effectuées avec une tension simple arrondie à 230V.

A1 Bilan des puissances lorsque la machine fonctionne en moteur

A1.1 Quelle est la vitesse de synchronisme de cette machine lorsqu'elle est alimentée par le réseau 50Hz. Exprimer cette grandeur en tr/mn et en rd/s En déduire la valeur nominale du glissement (g_N).

A1.2 Représenter schématiquement les différentes pertes de la machine asynchrone fonctionnant en moteur, ajouter sur ce schéma :

- la puissance absorbée sur le réseau (P_A)
- la puissance transmise au rotor (P_T)
- la puissance fournie par le rotor ($C_E \Omega$)
- la puissance utile (P_U)

Le schéma présenté doit prendre en compte les hypothèses simplificatrices énoncées plus haut.

A1.3 Calculer le couple nominal de ce moteur (C_N), le couple des pertes mécaniques (C_m), le couple électromagnétique nominal (C_{EN}), le couple électromagnétique maximal (C_{EM}) et le couple électromagnétique de démarrage (C_{ED}) en utilisant les données fournies par le constructeur.

A1.4 Pour le point de fonctionnement nominal et après avoir calculé la puissance transmise au rotor (P_{TN}), calculer les pertes joules rotoriques (P_{jRN}).

A1.5 Calculer la puissance active absorbée par ce moteur (P_{AN}) et les pertes fer (P_{fN}) au point de fonctionnement nominal.

A1.6 Expliquer pourquoi les pertes fer sont principalement situées au niveau du stator.

A2 Détermination des éléments du schéma équivalent

A2.1 Calculer la valeur de R_μ à partir des pertes fer.

A2.2 Etablir la relation exprimant la puissance active transmise au rotor. En déduire la formule du couple électromagnétique moyen du moteur (C_E) en fonction de V_S , Ω_S , X' , R'_R et g .

A2.3 Rechercher l'expression du glissement correspondant au couple électromagnétique maximal (C_{EM}). En déduire l'expression de C_{EM} .

A2.4 Compte tenu des valeurs numériques déterminées dans la partie A1, calculer la valeur de la réactance X' .

A2.5 On pose $R=R'_R/g_N$. Exprimer la puissance transmise au rotor P_{TN} au régime nominal. En déduire l'équation du second degré qui permet de déterminer la résistance R lorsque V_S , X' et P_{TN} sont connus. Donner la valeur numérique des trois coefficients de cette équation.

A2.6 Résoudre l'équation précédente, en déduire les deux valeurs de R qui correspondent à la puissance transmise donnée.

A2.7 Compte tenu de la valeur du facteur de puissance global du moteur, choisir la valeur numérique de R qui a un sens physique pour le problème. Justifiez votre choix et déterminer la valeur de R'_R .

A2.8 Calculer la puissance réactive consommée par la réactance X' au point de fonctionnement nominal (Q'_N).

A2.9 En déduire la valeur de la puissance réactive magnétisante ($Q_{X\mu}$) consommée par la réactance magnétisante. En déduire la valeur de X_μ .

A2.10 Vérifier la cohérence des résultats en recalculant P_{TN} avec le schéma équivalent.

A3 Critique du modèle théorique obtenu

A3.1 Déterminer la valeur moyenne du couple électromagnétique de démarrage de cette machine, lorsqu'elle est alimentée sous sa tension nominale, en utilisant les valeurs numériques du schéma monophasé équivalent précédemment déterminées.

A3.2 Calculer la valeur efficace du courant de démarrage dans les mêmes conditions d'alimentation.

A3.3 Comparer les valeurs trouvées précédemment aux données expérimentales du constructeur. Rédiger un paragraphe court qui explique et qui justifie ces écarts en considérant les phénomènes physiques qui se produisent dans la machine asynchrone à cage.

A3.4 Proposer une méthode pour étendre le domaine de validité de ce schéma monophasé équivalent en intégrant les phénomènes physiques décrits précédemment.

Pour la suite du problème, les valeurs numériques des éléments du schéma équivalent monophasé de la figure A2 sont arrondies aux valeurs suivantes :

- $R_{\mu}=19 \Omega$
- $X_{\mu}=1,3 \Omega$
- $X'=0,13 \Omega$
- $R'_R=5 \text{ m}\Omega$

Le couple correspondant aux pertes mécaniques est supposé constant, sa valeur est arrondie à 6,4 Nm. Comme ce schéma a été élaboré en considérant que la machine fonctionne en moteur, les puissances actives et réactives positives correspondent à un sens de transfert du réseau vers la machine. La convention de signe est gardée, lorsque l'éolienne fonctionne normalement, la puissance active est donc négative. Les pertes correspondent à de l'énergie consommée elles sont donc représentées par des nombres positifs.

A4 Fonctionnement de la machine en génératrice hypersynchrone

Les pales de l'éolienne sont fixées sur l'arbre lent de l'accélérateur mécanique à engrenages dont l'arbre de sortie est accouplé directement à celui de la machine asynchrone.

La vitesse de rotation de l'éolienne (N_L ou Ω_L) varie très peu car elle est imposée par la vitesse de synchronisme de la machine asynchrone et par son glissement. Le couple (C_L) qu'elle fournit à l'arbre lent du multiplicateur de vitesse dépend de la vitesse du vent et de l'orientation des pales. Ce couple est considéré comme une variable indépendante de toutes les autres. Le couple correspondant aux pertes mécaniques de l'accélérateur (C_a) est supposé constant, il est ramené à l'arbre de sortie de cet accélérateur qui tourne à la vitesse de la machine asynchrone (Ω).

Les caractéristiques de cet accélérateur sont les suivantes :

- rapport de multiplication : $m=35$
- couple des pertes mécaniques ramené à l'arbre de sortie : $C_a=40 \text{ Nm}$.

A4.1 Etablir l'expression simplifiée du couple électromagnétique de la machine asynchrone valable lorsque le glissement est faible ($g \ll 1$).

A4.2 Compte tenu des valeurs numériques arrondies des éléments du schéma équivalent données précédemment, esquisser la courbe de la valeur exacte puis de la valeur approchée du couple électromagnétique (C_E) en fonction du rapport Ω/Ω_S lorsque Ω varie de $0,95\Omega_S$ à $1,05\Omega_S$. Mettre en évidence la portion des courbes qui correspond au fonctionnement normal de l'éolienne.

A4.3 Calculer l'erreur relative introduite par l'utilisation de la formule approchée pour $|g|=1\%$.

A4.4 Dessiner un croquis mettant en évidence le transfert de puissance et les différentes pertes du système électromécanique complet que constitue l'éolienne. Ce croquis doit aussi situer les grandeurs suivantes :

- C_L et Ω_L : le couple et la vitesse au niveau de l'arbre lent de l'accélérateur
- C , C_E et Ω : le couple, le couple électromagnétique et la vitesse de la machine asynchrone
- Ω_S et P_M : la vitesse de synchronisme et la puissance transmise au réseau.

A4.5 On suppose que le vent fournit un couple de 67500 Nm à l'arbre lent de l'accélérateur mécanique ($C_L=67500$ Nm). Avec cette condition particulière de fonctionnement, et en respectant la convention de signe définie précédemment, calculer :

- le couple sur l'arbre de la machine asynchrone (C)
- le couple électromagnétique (C_E)
- la valeur approchée du glissement (g)
- la vitesse de rotation de la machine asynchrone en rd/s et en tr/mn (Ω et N)
- la vitesse de rotation de l'éolienne en rd/s et en tr/mn (Ω_L et N_L)
- la puissance utile fournie au réseau (P_M).

A4.6 Après avoir calculé la valeur efficace du courant rotorique ramené au stator (I_R), calculer la puissance réactive mise en jeu dans la machine asynchrone. En déduire la valeur efficace du courant en ligne (I_S) et le facteur de puissance de cette installation.

A4.7 Calculer l'angle de déphasage entre la tension simple aux bornes de la machine et le courant en ligne en respectant les conventions de signe définies au début du sujet. Dessiner le diagramme vectoriel représentant les nombres complexes \underline{V}_S et \underline{I}_S .

Pour améliorer le facteur de puissance de l'installation, on connecte au réseau trois batteries monophasées de condensateurs couplées en triangle.

A4.8 Calculer la puissance réactive (Q_C) que doivent fournir les batteries de condensateurs pour minimiser la valeur efficace du courant en ligne lorsque l'éolienne fonctionne dans les conditions définies précédemment. En déduire la capacité des trois batteries de condensateurs et la valeur efficace du courant qui les traverse.

Pour connecter l'éolienne au réseau, on procède en deux temps. Le premier temps consiste à connecter les enroulements statoriques au réseau par l'intermédiaire de résistances afin de limiter les courants statoriques transitoires, pendant cette phase les pales de l'éolienne sont orientées de façon à ce que le couple fourni soit nul. Après quelques secondes, les résistances sont éliminées puis le système de régulation oriente les pales pour faire croître la puissance.

A4.9 Dessiner le schéma du circuit de puissance du dispositif complet de connexion de l'éolienne et de ses batteries de condensateurs au réseau en ajoutant tous les dispositifs

nécessaires à assurer la protection de cet ensemble. Décrire brièvement la fonction de chaque élément du schéma.

Partie B : Fonctionnement autonome

La machine asynchrone peut fonctionner en génératrice hypersynchrone si elle est connectée à une source triphasée qui lui permet de produire son champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme (Ω_s). L'onduleur autonome de la figure B1 réalise cette fonction, il permet en outre d'assurer la continuité du service lorsque la vitesse du vent est trop faible pour faire fonctionner l'éolienne.

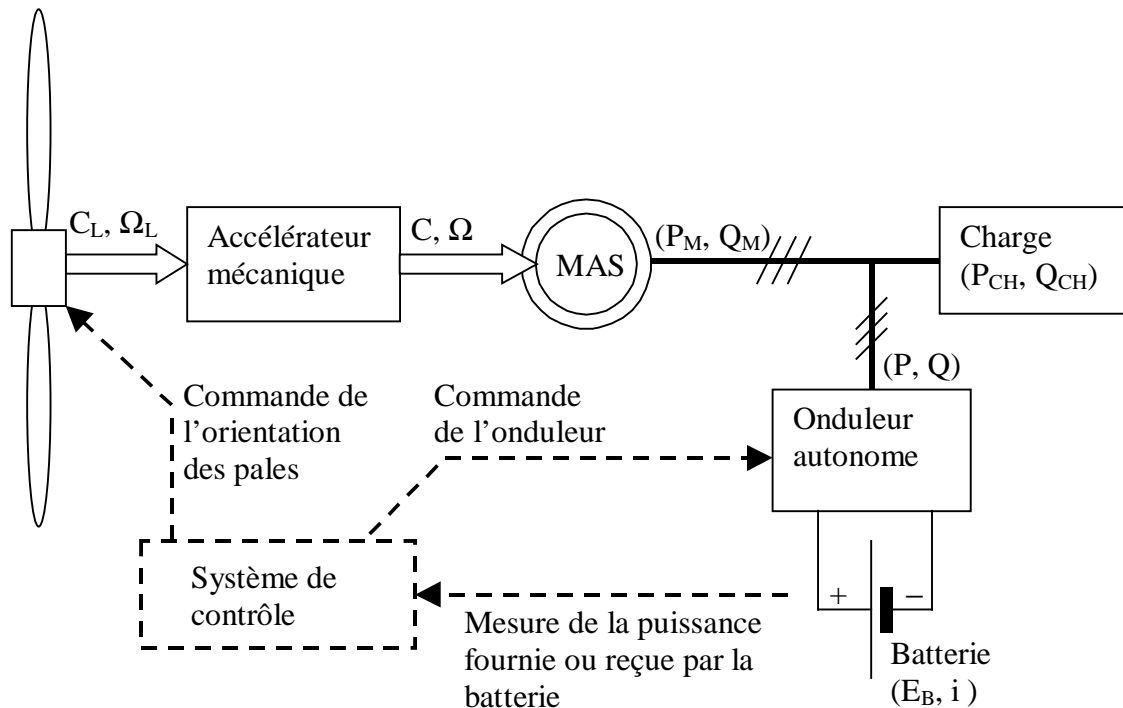


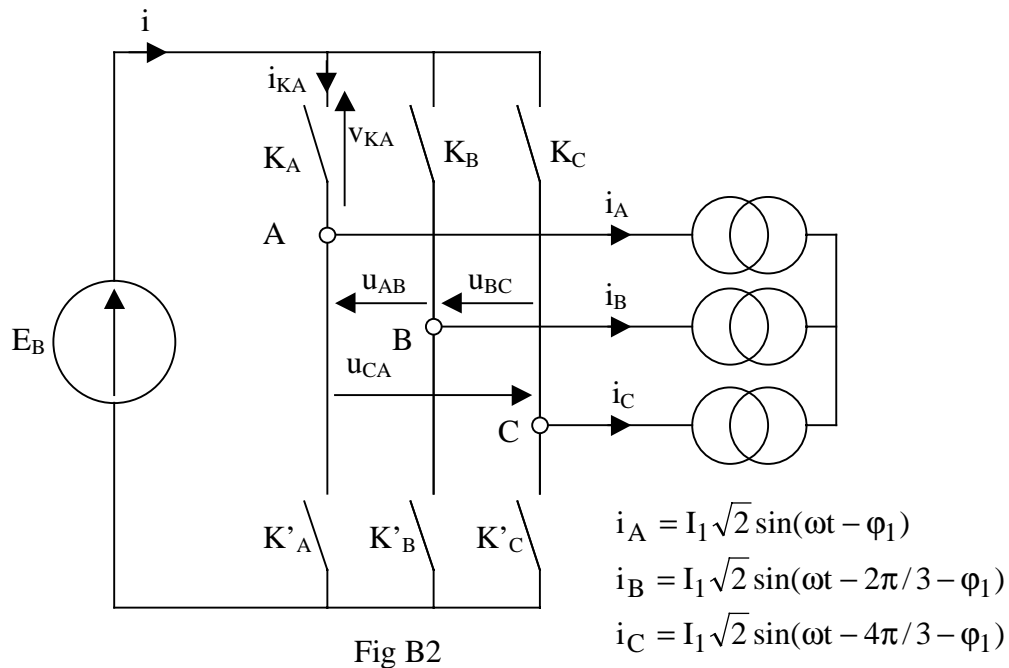
Fig. B1

L'onduleur autonome doit être réversible pour permettre la recharge de la batterie lorsque la puissance du vent le permet. Le système de contrôle fixe la fréquence de l'onduleur et régule la puissance d'entrée du système en agissant sur l'orientation des pales.

B1 Etude préliminaire : onduleur triphasé à 120° alimentant une charge inductive

Pour cette partie, la batterie est supposée parfaite, elle est modélisée par une source de tension de force électromotrice E_B et de résistance interne nulle. Dans un premier temps, seul le fondamental du courant absorbé par la charge est pris en compte : la charge triphasée est donc modélisée par trois générateurs de courants sinusoïdaux déphasés de 120°. Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

Ces hypothèses sont symbolisées par le schéma de la figure B2 où les conventions de signe sont définies.



Chaque interrupteur électronique est repéré par un symbole ($K_A, K'_A, K_B, K'_B, K_C, K'_C$), le même symbole désigne aussi sa variable logique de commande ($K_A=1$ signifie que l'interrupteur K_A est fermé). I_1 désigne la valeur efficace du fondamental du courant absorbé par la charge et φ_1 , le déphasage du fondamental de ce courant par rapport au fondamental de la tension simple aux bornes de la charge.

Les formes d'ondes des diverses grandeurs seront tracées sur le document réponse 1 pour une valeur particulière de l'angle φ_1 de 45° mais les calculs doivent être conduits avec les expressions littérales.

B1.1 Rappeler la définition de la source de tension réversible en courant. Donner un exemple autre que la batterie.

B1.2 Définir les conditions que les variables logiques $K_A, K'_A, K_B, K'_B, K_C$ et K'_C doivent remplir pour assurer la non destruction des interrupteurs électroniques. Expliquez votre raisonnement.

B1.3 Proposer une séquence temporelle de commande des interrupteurs de cet onduleur pour obtenir des tensions dont les fondamentaux forment un système triphasé équilibré de séquence directe (Compléter le document réponse 1 en surlignant le segment de droite lorsque l'interrupteur est commandé).

B1.4 Tracer les formes d'ondes des tensions u_{AB}, u_{BC} et u_{CA} sur le document réponse 1.

B1.5 Décomposer en série de Fourier les ondes de tensions u_{AB}, u_{BC} et u_{CA} . En déduire les rangs, les expressions des valeurs efficaces et les séquences des premiers harmoniques non nuls des tensions composées. Présenter les résultats sous forme de tableau.

B1.6 Tracer la forme d'onde de la tension simple v_{AN} sur le document réponse 1. On peut considérer que les tensions simples sont définies par rapport à un point neutre artificiel obtenu avec trois résistances identiques comme le montre la figure B3.

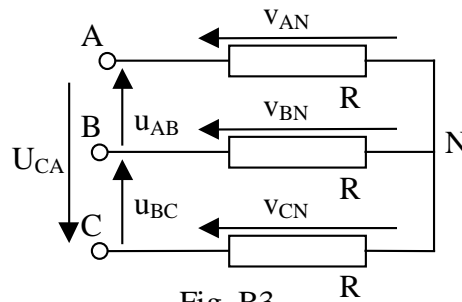


Fig. B3

B1.7 Placer les trois sinusoïdes représentant les fondamentaux des courants i_A , i_B et i_C sur le document réponse 1 pour $\varphi_1=45^\circ$.

B1.8 Après avoir donné l'expression du courant circulant dans la batterie (i) en fonction de i_A , i_B et i_C pendant chaque phase du fonctionnement de l'onduleur, tracer la forme d'onde du courant i .

B1.9 Donner la caractéristique statique $i_{KA}=f(v_{KA})$ de l'interrupteur K_A de l'onduleur de la figure B2. Préciser les mécanismes de commutations de cet interrupteur et proposer une solution technologique pour le réaliser.

B1.10 Calculer la force électromotrice de la batterie (E_B) nécessaire pour obtenir un système triphasé dont les fondamentaux des tensions simples valent 230 V efficaces.

B1.11 Déterminer l'expression de la puissance active fournie par cet onduleur. En déduire celle de la valeur moyenne du courant débité par la batterie ($\langle i \rangle$).

B2 Fonctionnement réel de l'onduleur à 120°

Dans la réalité, l'onduleur n'est pas connecté à une simple charge mais à l'ensemble constitué par l'éolienne et la charge décrit à la figure B1. Il convient donc de définir la charge équivalente de l'onduleur avant de calculer la valeur moyenne du courant circulant dans la batterie. Les hypothèses simplificatrices sont les mêmes que celles utilisées dans la partie précédente (batterie parfaite, courants sinusoïdaux). Le schéma équivalent de la figure B2 est donc utilisable, seules les valeurs de I_1 et de φ_1 sont modifiées. La valeur numérique de la force électromotrice de la batterie, correspondant à un réseau dont la valeur efficace du fondamental de la tension simple vaut 230 V, est arrondie à la valeur

$$E_B=510V.$$

Les conventions de signes sont les mêmes que celles de la partie A : les puissances actives ou réactives consommées coté triphasé correspondent à des valeurs numériques positives ; les puissances produites sont donc négatives.

Pour étudier cet ensemble, on considère deux points de fonctionnement de l'éolienne. Le premier correspond à la pleine puissance, les quantités mises en jeu sont les suivantes :

- $P_{M1}=-300$ kW
- $Q_{M1}=+200$ kVAR

La second correspond à un vent relativement faible :

- $P_{M2}=-23$ kW
- $Q_{M2}=+123$ kVAR

La charge est supposée consommer en permanence $P_{CH}=200$ kW avec un facteur de puissance $\cos \varphi_{CH}=0,8$ AR (courant en retard de l'angle φ_{CH} par rapport à la tension).

B2.1 Pour chaque point de fonctionnement, déterminer la puissance active, la puissance réactive, la valeur efficace de la composante fondamentale du courant en ligne (I_1) et son déphasage par rapport au fondamental de la tension simple (φ_1).

B2.2 Déterminer la valeur moyenne du courant circulant dans la batterie pour chacun des points de fonctionnement définis en préambule. Préciser si la batterie se charge ou se décharge.

B2.3 Définir la capacité de la batterie qui permet d'alimenter la charge pendant 10 heures lorsque l'éolienne fonctionne à puissance réduite (second point de fonctionnement).

B2.4 Dimensionner les composants actifs constituant les interrupteurs électroniques de cet onduleur dans le cas le plus défavorable. Il est nécessaire de prévoir une marge de sécurité de 20% sur les contraintes en courant et de 30% sur les contraintes en tension.

B2.5 On ajoute, côté triphasé, une batterie de condensateurs capable de fournir une puissance réactive de 250 kVAR. Dimensionner à nouveau les composants actifs de l'onduleur en prenant les mêmes marges de sécurité.

B2.6 On peut remarquer qu'une règle de base de l'électronique de puissance n'est plus respectée. Enoncer cette règle et préciser les inconvénients que son non respect produit. Proposer une solution technologique pour faire fonctionner correctement cet onduleur avec la batterie de condensateurs.

On utilise une écriture complexe basée sur la terminologie du vecteur espace pour expliciter plus simplement les valeurs instantanées des grandeurs triphasées. Les vecteurs espaces \underline{v} et \underline{i} sont définis par :

$$\underline{v} = \frac{2}{3} \left(v_A + a v_B + a^2 v_C \right)$$

$$\underline{i} = \frac{2}{3} \left(i_A + a i_B + a^2 i_C \right)$$

où le nombre complexe « a » exprime le déphasage de 120° ($a = e^{j2\pi/3}$). La fin de la partie B2 sera traitée avec un courant arrondi à la valeur $I_1=530$ A eff.

B2.7 Montrer que les trois courants i_A , i_B , et i_C en sortie de l'onduleur s'expriment par

$$\underline{i} = I_1 \sqrt{2} e^{j(\omega t - \varphi_1 - \pi/2)}$$

B2.8 Appliquer la définition du vecteur espace à la série de Fourier exprimant les tensions composées produites par l'onduleur (u_{AB} , u_{BC} , et u_{CA}) pour obtenir le vecteur espace des tensions composées (\underline{u}). On limitera la série aux cinq premiers termes (fondamental et quatre premiers harmoniques non nuls). L'origine des temps utilisée pour écrire la série de Fourier doit être la même pour les tensions et les courants.

B2.9 Connaissant les relations liant les tensions simples aux tensions composées, établir la formule du vecteur espace représentant les tensions simples (\underline{v}).

La puissance instantanée peut être déterminée directement à partir des vecteurs espaces \underline{v} et \underline{i} par la relation

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\underline{v} \underline{i}^* \right] \quad [1]$$

où Re signifie « partie réelle » et \underline{i}^* désigne le nombre complexe conjugué de \underline{i} .

B2.10 Exprimer la série de Fourier représentant la puissance instantanée en sortie de l'onduleur.

B2.11 En déduire la composition spectrale du courant circulant dans la batterie en considérant que l'onduleur ne dissipe ni ne stocke aucune énergie.

Lorsque la puissance active fournie par l'éolienne est exactement égale à la puissance active consommée par la charge, le courant moyen dans la batterie est nul. Il ne reste que les composantes harmoniques. La batterie peut être remplacée par un condensateur que l'on suppose initialement chargé à la tension E_B .

B2.12 Déterminer la capacité de ce condensateur pour limiter valeur efficace de la composante alternative de la tension à ses bornes à 5% de E_B . Pour simplifier, on ne considèrera que l'harmonique dont la valeur efficace est la plus forte.

B2.13 Imaginez un système de contrôle de l'éolienne capable de réguler la valeur moyenne de la tension aux bornes de ce condensateur.

B2.14 Etablir une liste des problèmes qui peuvent se poser lors de la mise en fonctionnement d'un tel système.

B3 Influence des harmoniques de tension sur la machine asynchrone

En fonctionnement autonome, les valeurs instantanées des tensions alternatives sont imposées par l'onduleur. La machine asynchrone est donc soumise à des harmoniques de tension dont les rangs, les séquences et les valeurs efficaces ont été déterminés précédemment. Ces harmoniques produisent des courants harmoniques et des couples harmoniques qui risquent de faire vibrer la partie mécanique de l'éolienne.

Pour étudier ces phénomènes, on suppose que la machine n'est pas saturée, il est donc possible d'utiliser le principe de superposition et de considérer séparément l'influence de chaque harmonique.

En fonctionnement normal le rotor tourne à une vitesse proche de la vitesse de synchronisme imposée par les composantes fondamentales des courants statoriques (1500 tr/mn). Pour le calcul des glissements relatifs aux champs tournants harmoniques, on peut supposer que le rotor tourne exactement à 1500 tr/mn. Le document réponse 2 doit être utilisé pour répondre aux questions B3.1, B3.2 et B3.3.

B3.1 Déterminer la vitesse de synchronisme et le sens de rotation du champ tournant créé par les quatre premiers harmoniques non nuls de courant. On prend comme référence le sens du champ tournant produit par le fondamental. Lorsque les courants harmoniques produisent un champ tournant dans l'autre sens, la vitesse correspondante est donc négative.

B3.2 Calculer le glissement g_n relatif au champ tournant de rang n pour les quatre premiers harmoniques non nuls.

B3.3 Déterminer les valeurs numériques des éléments du schéma équivalent monophasé pour les quatre premiers harmoniques non nuls.

B3.4 Compte tenu des valeurs numériques précédemment calculées pour les harmoniques, effectuer les simplifications nécessaires sur le schéma monophasé équivalent en négligeant les impédances qui ont peu d'influence. On se contentera d'une précision de l'ordre $\pm 15\%$ sur la valeur efficace des courants harmoniques. Expliquez votre démarche.

B3.5 En déduire les valeurs efficaces et les phases des quatre premiers harmoniques non nuls de courant.

D'une manière générale, on peut dire que le couple électromagnétique produit par une machine électrique tournante résulte de l'interaction de deux champs magnétiques. En l'absence d'aimants permanents, l'un des champs résulte des courants circulants dans la partie fixe de la machine, l'autre des courants circulants dans la partie tournante. Le couple est constant quand les champs sont synchrones, il est maximum lorsque ces deux champs sont perpendiculaires.

Ce principe peut être développé en utilisant le formalisme du vecteur espace. Lorsque les pertes fer sont négligées, cette méthode aboutit à la relation

$$C_E = \frac{3}{2} p \underline{\Psi}_\mu \wedge \underline{i}_S \quad [2]$$

Dans cette formule p est le nombre de paires de pôles par phase, $\underline{\Psi}_\mu$ le vecteur espace représentant le flux magnétisant totalisé et \underline{i}_S le vecteur espace courant statorique. Le flux magnétisant totalisé est obtenu directement à partir de la réactance magnétisante (figure A2) et du courant qui la traverse.

Avec les vecteurs espaces, le produit vectoriel se calcule de façon classique en effectuant le produit des modules des vecteurs et en multipliant le résultat par le sinus de l'angle défini par les deux vecteurs ; cet angle est compté positivement lorsque la rotation du premier vecteur vers le second se fait dans le sens trigonométrique. On rappelle qu'en sinusoïdal, le module du vecteur espace correspond à la valeur crête de la grandeur qu'il représente.

B3.6 Utiliser le schéma équivalent monophasé de la figure A2, en négligeant les pertes fer, pour calculer la valeur efficace de la composante fondamentale du courant statorique et son déphasage par rapport à la tension simple pour $V_{S1}=230V$, $X_\mu=1,3\Omega$, $X'=0,13\Omega$, $R'_R=5m\Omega$ et $g=-1\%$.

B3.7 Calculer les modules des vecteurs espaces $\underline{\Psi}_{\mu 1}$ et \underline{i}_{S1} représentant les composantes fondamentales du flux magnétisant totalisé et du courant statorique.

B3.8 Représenter, dans le plan complexe, les vecteurs espaces \underline{v}_{S1} , $\underline{\Psi}_{\mu 1}$ et \underline{i}_{S1} à l'instant $t=0$. Ces vecteurs espaces représentent respectivement les termes fondamentaux des tensions simples, du flux magnétisant et des courants statoriques. Préciser le sens et la vitesse de rotation de chaque vecteur espace.

B3.9 En déduire la valeur du couple électromagnétique produit par les composantes fondamentales en utilisant la relation [2]. Comparer cette valeur au résultat obtenu avec la formule classique (question A2.2).

Une première estimation des couples harmoniques peut être faite en considérant l'interaction des composantes harmoniques du courant statorique et de la composante fondamentale du flux magnétisant. Ceci revient à négliger les harmoniques du courant magnétisant. Les harmoniques

du courant statorique sont ceux de la question B3.4 en tenant compte des simplifications déjà effectuées.

B3.10 Placer, dans le plan complexe et à $t=0$, les vecteurs espaces $\underline{\Psi}_{u1}$, $\underline{V}_{S(6k-1)}$ et $\underline{i}_{S(6k-1)}$ représentant respectivement le flux magnétisant fondamental et les termes de rang $6k-1$ (k entier) des tensions et des courants statoriques. Préciser le sens et la vitesse de rotation de chaque vecteur espace.

B3.11 En déduire l'expression temporelle de la composante de couple produit par l'interaction de la composante fondamentale du flux magnétisant et des courants harmoniques de rang $6k-1$.

B3.12 Reprendre la démarche des deux questions précédentes pour les harmoniques de courant de rang $6k+1$. En déduire les fréquences et les valeurs crête des deux premières raies de couple.

B4 Utilisation d'un onduleur MLI

Pour limiter la valeur des courants harmoniques dans la machine asynchrone, on utilise un onduleur MLI dont le circuit de puissance est constitué de trois bras d'IGBT qui matérialisent les interrupteurs K_A , K'_A , K_B , K'_B , K_C et K'_C du schéma de la figure B2. Le principe du circuit de commande de cet onduleur est basé sur la comparaison de sinusôides de références (x_1 , x_2 et x_3) à un signal triangulaire (y) de fréquence élevée (f_{MLI}). Le schéma synoptique de la figure B4 explicite ce principe.

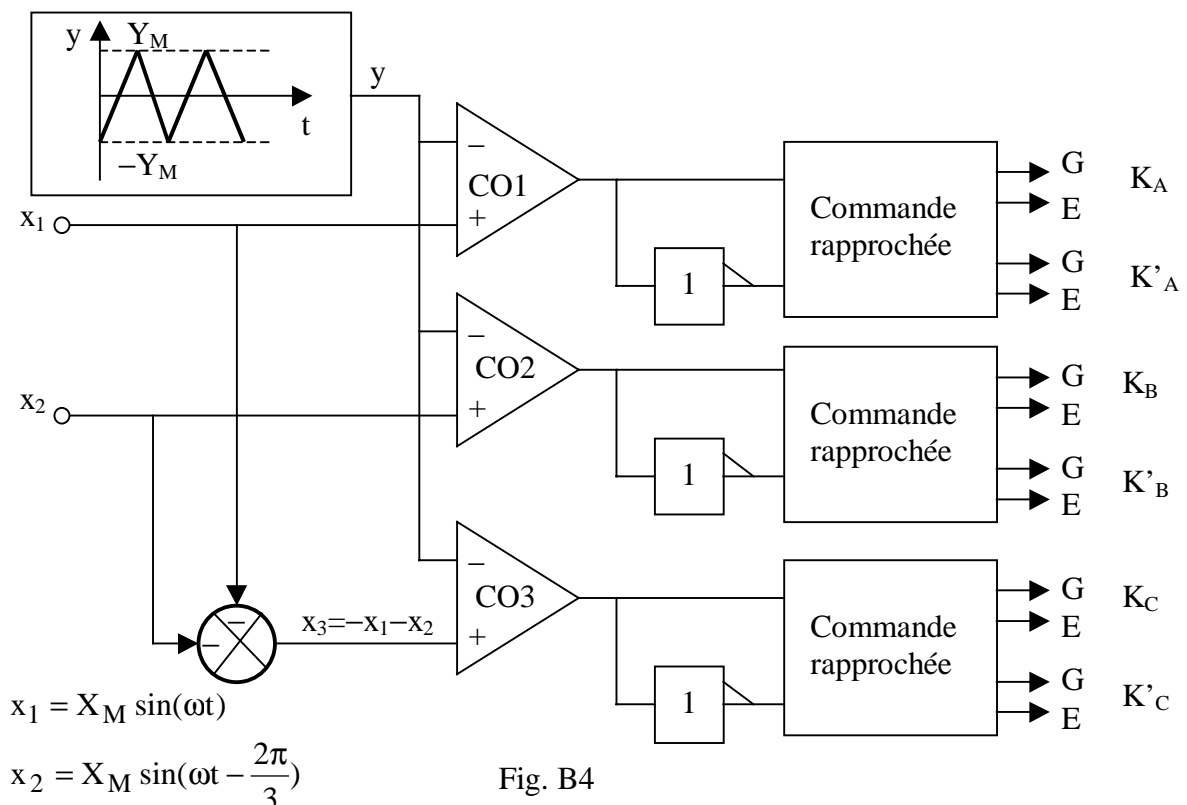


Fig. B4

Les comparateurs $CO1$, $CO2$ et $CO3$ sont dotés de sorties logiques dont les niveaux sont compatibles avec les inverseurs et les entrées du circuit de commandes rapprochée.

Le coefficient de réglage en tension (r), défini par

$$r = \frac{X_M}{Y_M}$$

est obligatoirement inférieur à 1.

On admet que, lorsque la fréquence de découpage (f_{MLI}) est grande par rapport à la fréquence des sinusoïdes de références, les valeurs instantanées des composantes basses fréquences des tensions simples fournies par l'onduleur suivent les signaux de références. En première approximation, les tensions simples peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} v_{AN} = \frac{E_B}{2} \frac{x_1}{Y_M} \\ v_{BN} = \frac{E_B}{2} \frac{x_2}{Y_M} \\ v_{CN} = \frac{E_B}{2} \frac{x_3}{Y_M} \end{cases}$$

Les bras d'IGBT seront choisis parmi une famille dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- tension collecteur émetteur de saturation : $V_{CEsat}=2V$
- chute de tension directe aux bornes d'une diode : $V_F=1,5V$
- temps de montée du courant collecteur : $t_r=300$ ns
- temps de descente du courant collecteur : $t_f=500$ ns
- résistance thermique jonction boîtier : $R_{JC}=0,03^\circ K/W$ (pour un bras)
- température de jonction maximale : $T_{JM}=150^\circ C$.

B4.1 Expliquer pourquoi l'utilisation d'un onduleur MLI permet de réduire les courants harmoniques qui circulent dans la machine asynchrone.

B4.2 Déterminer la force électromotrice de la batterie (E_B) de façon à produire une tension simple de 230 volts efficaces pour $r=0,9$.

B4.3 Dimensionner les IGBT de cet onduleur lorsque le point de fonctionnement de l'éolienne est tel que $P_M=-23$ kW , $Q_M=+123$ kVAR , $V_S=230V$ et lorsque la charge consomme $P_{CH}=+200$ kW avec un facteur de puissance $\cos \varphi_{CH}=0,8$ AR (ce point de fonctionnement a été étudié dans la partie B2). Il est nécessaire de prévoir une marge de sécurité de 20% sur les contraintes en courant et de 30% sur les contraintes en tension.

B4.4 Estimer les pertes par conduction dans un IGBT et dans une diode d'un bras de l'onduleur dans les conditions précédemment définies. Expliquez votre démarche et justifiez les approximations faites.

B4.5 Estimer les pertes par commutation des IGBT dans les mêmes conditions et lorsque la fréquence de découpage est fixée à $f_{MLI}=5kHz$. Expliquez votre démarche et justifiez les approximations faites.

B4.6 Après avoir calculé les pertes totales dans les trois bras de l'onduleur et établi le schéma thermique équivalent, calculer la résistance thermique du radiateur sur lequel sont fixés les trois bras de l'onduleur. La température ambiante maximale est $T_A=50^\circ C$.

B4.7 Calculer la température du radiateur lorsque $T_A=50^\circ C$.

B4.8 Décrire les fonctions des circuits de commande rapprochée des bras de l'onduleur à IGBT. Esquisser le schéma structurel d'un tel circuit et mettre en évidence les connexions qui doivent être les plus courtes possibles.

B4.9 Proposer une méthode de commande qui assure le démarrage de l'ensemble formé par l'éolienne et l'onduleur MLI.

B4.10 Proposer un schéma synoptique du système de contrôle et de démarrage de l'éolienne.

Partie C : Etude de l'influence de l'impédance interne du réseau

L'éolienne est maintenant connectée à un réseau de distribution 50 Hz dont la puissance de court-circuit est finie. La puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine est fournie par le réseau, l'onduleur n'a plus de raison d'être.

C1 Détermination expérimentales des caractéristiques du réseau

Pour déterminer expérimentalement les caractéristiques du réseau de distribution au point de connexion de l'éolienne, on procède à trois essais. Le premier essai consiste à mesurer la valeur efficace de la tension composée du réseau lorsque le circuit est ouvert. La tension mesurée dans ces conditions vaut

$$U_0=407 \text{ V}$$

Les deux autres essais sont faits lorsqu'il n'y a pas de vent, la machine fonctionne alors en moteur asynchrone. La figure C1 montre le dispositif expérimental utilisé.

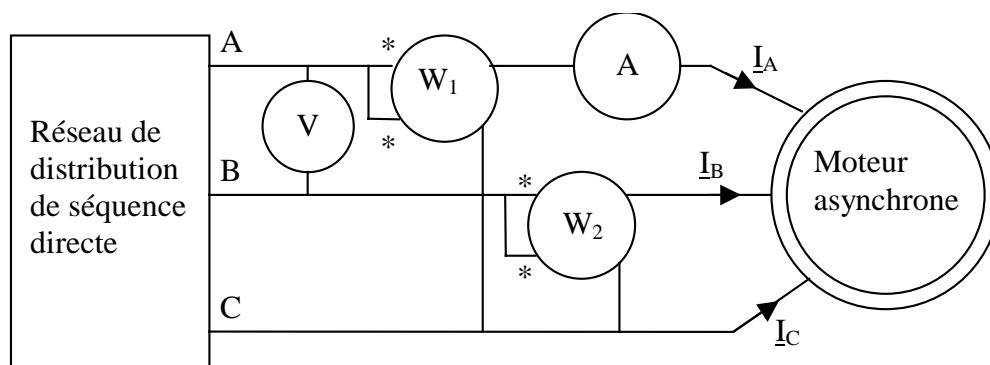


Fig. C1

Les appareils sont supposés suffisamment précis pour fournir des mesures avec trois chiffres significatifs. On suppose que le réseau et la charge sont parfaitement équilibrés. Lors du second essai le moteur asynchrone fonctionne à très faible charge : les pales sont orientées de façon à minimiser le couple résistant. Le troisième essai correspond à un fonctionnement en moteur asynchrone en charge. Cet essai est réalisable en agissant sur l'orientation des pales de l'éolienne.

Les valeurs affichées par les appareils sont reproduites dans le tableau de la figure C2.

	Essai 2	Essai 3	Unité
Voltmètre	397	383	Volt
Wattmètre W1	+39300	+194000	Watt
Wattmètre W2	-30800	+87800	Watt
Ampèremètre	177	507	Ampère

Fig. C2

C1.1 Déterminer les puissances actives et réactives consommées par le moteur pendant les essais 2 et 3. En déduire les valeurs du facteur de puissance.

C1.2 Tracer deux diagrammes de Fresnel triphasés correspondant aux essais 2 et 3 en respectant approximativement les déphasages entre les tensions simples et les courants en ligne. Sur chaque diagramme, mettre en évidence graphiquement les quantités mesurées par les wattmètres W1 et W2.

C1.3 Il y a une ligne redondante dans le tableau de mesures de la figure C2. Recalculer les puissances actives et réactives correspondant aux essais 2 et 3 sans utiliser la donnée que vous jugez redondante. Recalculer ensuite la valeur non utilisée à partir des 3 autres et conclure sur la pertinence des valeurs relevées.

C1.4 On utilise souvent un seul wattmètre associé à un transformateur d'intensité et à un commutateur de wattmètre pour réaliser le montage dont le principe est décrit à la figure C1. Esquisser le schéma qui sera réellement câblé et expliquer les raisons des choix technologiques.

Pour la suite du problème, on considère le schéma monophasé équivalent de la figure C3 où \underline{E}_s , R_L et X_L définissent respectivement la force électromotrice du réseau, sa résistance et sa réactance interne.

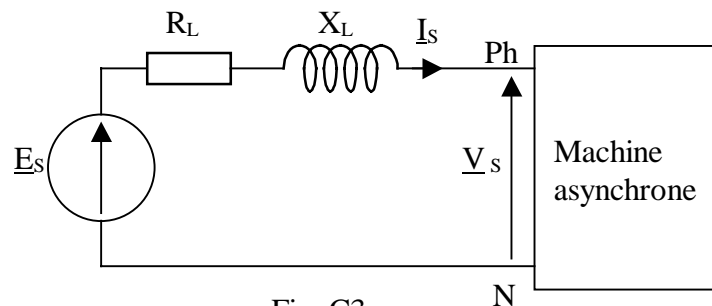


Fig. C3

C1.5 Tracer le diagramme de Fresnel qui met en évidence les grandeurs \underline{E}_s , \underline{V}_s , \underline{I}_s , les chutes de tension $R_L \underline{I}_s$ et $X_L \underline{I}_s$, ainsi que l'angle de déphasage entre \underline{V}_s et \underline{I}_s .

C1.6 Etablir la relation donnant la valeur exacte de la valeur efficace de la force électromotrice E_s en fonction des autres grandeurs définies sur le schéma équivalent de la figure C3.

C1.7 Simplifier la relation précédente pour retrouver la formule approchée habituellement utilisée en électrotechnique pour calculer la chute de tension en ligne. Préciser les conditions de validité de cette formule simplifiée.

C1.8 En utilisant la formule approchée de la chute de tension et les données issues des 3 essais définis en préambule, établir un système de deux équations à deux inconnues permettant de calculer R_L et X_L . Calculer les valeurs numériques des coefficients du système.

C1.9 Résoudre le système précédent, calculer R_L et X_L .

C1.10 En déduire la puissance apparente de court-circuit du réseau (S_{CC}) au point de connexion de l'éolienne et le facteur de puissance correspondant ($\cos\phi_{CC}$).

C1.11 Rédiger un paragraphe de quelques lignes pour discuter de la validité et de la précision du modèle adopté pour caractériser le réseau de distribution.

C2 Fonctionnement normal de l'éolienne connectée au réseau

Dans un premier temps on considère les données suivantes :

- valeur efficace du courant en ligne : $I_S=500\text{A}$
- facteur de puissance de l'éolienne : $\cos\varphi=-0,8$.

Le schéma est celui de la figure C3 où les valeurs numériques des éléments sont arrondies à $R_L=12\text{ m}\Omega$ et $X_L=32\text{ m}\Omega$.

C2.1 Après avoir déterminé la valeur numérique du déphasage φ entre le courant et la tension, tracer le diagramme de Fresnel qui représente les vecteurs associés aux nombres complexes \underline{E}_S , \underline{V}_S et \underline{I}_S en tenant compte des chutes de tension en ligne.

C2.2 En déduire la relation exacte puis la relation approchée qui permet de calculer E_S en fonction de V_S , I_S , φ et des éléments R_L et X_L qui caractérisent la ligne.

C2.3 Calculer la tension V_S avec la formule approchée lorsque $E_S = 235\text{V}$ ($407/\sqrt{3}$).

En réalité, le courant I_S et le facteur de puissance $\cos\varphi$ ne sont pas connus car ils dépendent du point de fonctionnement de la machine principalement défini par son glissement (g). Le glissement dépend lui-même du couple électromagnétique fourni à la machine et de la tension statorique. Le problème est donc beaucoup plus complexe. Pour le simplifier on supposera que la tension V_S varie peu. Dans ces conditions le glissement ne dépend que du couple électromagnétique fourni à la génératrice hypersynchrone, il sera considéré comme une variable indépendante variant entre $-0,1\%$ et -1% selon la force du vent. Pour calculer la valeur efficace de la tension statorique (V_S) on utilisera la méthode de Boucherot qui sera appliquée au schéma de la figure C4 représentant l'ensemble du système.

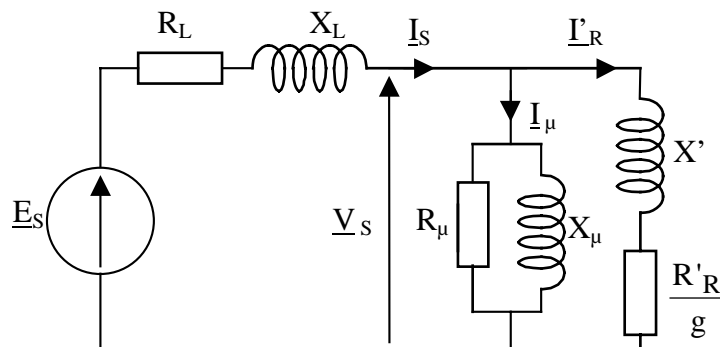


Fig. C4

On rappelle que la méthode de Boucherot consiste à faire un bilan comptable des puissances actives et réactives pour chaque partie du schéma et d'en déduire les grandeurs inconnues. Le bilan peut être fait en partant d'une valeur fictive de la tension statorique (V_{SF}) pour en déduire la valeur fictive correspondante de la force électromotrice (E_{SF}) puis de revenir aux valeurs réelles par une règle de trois en considérant la valeur réelle de E_S . Le document réponse 3 doit être utilisé pour traiter les questions C2.4 et C2.5.

C2.4 Appliquer la méthode de Boucherot au schéma équivalent de la figure C4 en partant de la valeur fictive $V_{SF}=230\text{V}$ pour $g=-0,1\%$. En déduire les valeurs réelles de V_S et de I_S d'une part et des puissances actives et réactives lorsque $E_S=235\text{V}$.

C2.5 Recommencer le calcul lorsque $g=-1\%$. En déduire la plage de variation de la tension du réseau selon le point de fonctionnement de l'éolienne.

C2.6 En prenant comme référence la tension à vide, comparer les variations maximales de la tension V_s lorsque la machine fonctionne en moteur d'une part et en génératrice d'autre part. Expliquez qualitativement ces résultats.

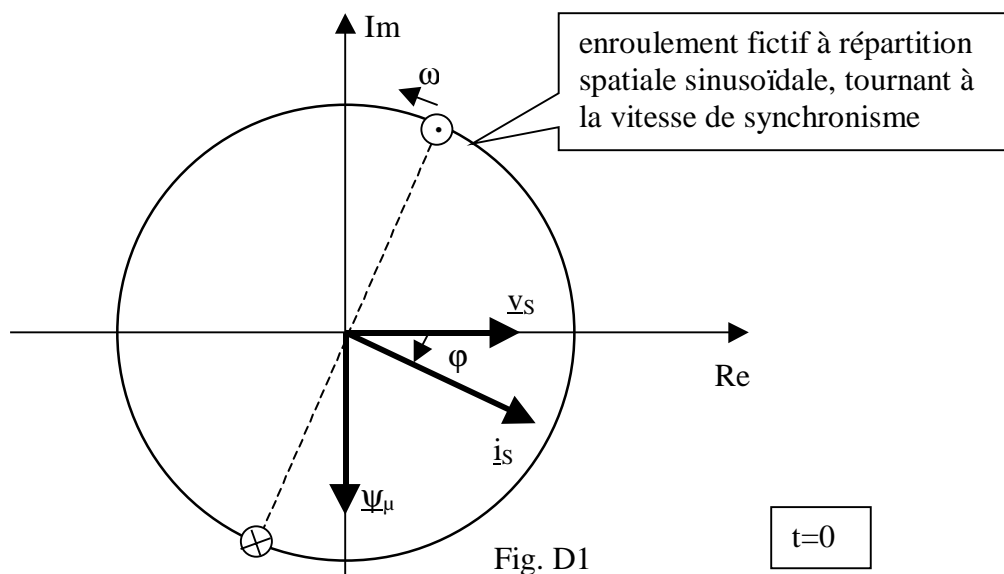
C2.7 On connecte, en parallèle sur la machine asynchrone, une batterie triphasé de condensateurs amenant une puissance réactive de 150 kVAR lorsqu'elle est alimentée par un système triphasé dont la tension simple vaut 230V. Calculer la nouvelle valeur de la tension statorique par la méthode de Boucherot lorsque $g=-1\%$.

Partie D : dimensionnement d'une machine asynchrone lente

L'objectif de cette partie est d'étudier la possibilité de supprimer l'accélérateur mécanique de l'éolienne en concevant une machine asynchrone de 300 kW dont la vitesse de synchronisme est légèrement inférieure à 43 tr/mn lorsqu'elle est connectée au réseau 50 Hz. Compte tenu de ces valeurs numériques, cette nouvelle machine asynchrone doit posséder 70 paires de pôles par phase ($p=70$).

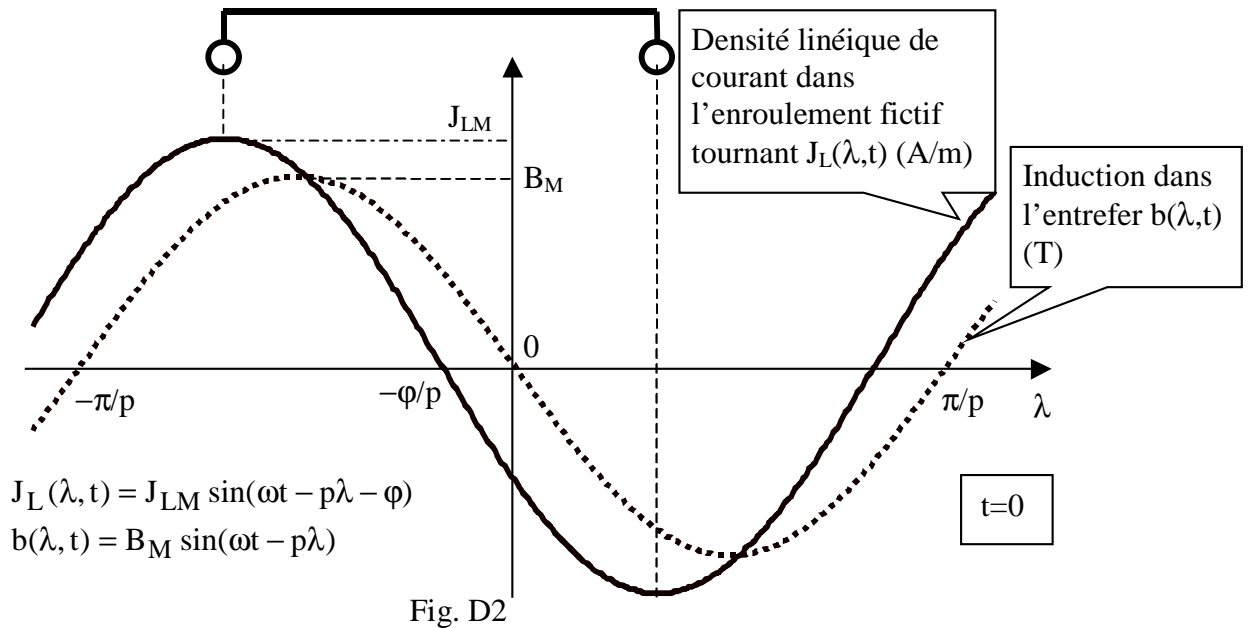
Pour mener à bien ce dimensionnement, on suppose que la force magnétomotrice, créée par les enroulements, a une répartition spatiale sinusoïdale. Les pertes fer sont négligées ainsi que les chutes de tension dues aux résistances et aux inductances de fuites des enroulements statoriques.

On rappelle que le vecteur espace courant statorique pointe en permanence le point de l'entrefer où la force magnétomotrice statorique est maximale, de même $\underline{\psi}_\mu$ pointe le point de l'entrefer où l'induction est maximale. On peut considérer que la force magnétomotrice tournante produite par le système de courant triphasé équilibré circulant dans les bobinages statoriques réels est équivalente à celle produite par un enroulement fictif à répartition spatiale sinusoïdale, tournant à la vitesse de synchronisme, parcouru par un courant continu. La figure D1, dessinée à l'instant $t=0$, illustre ces propos et précise la position relative des vecteurs espaces. Tous les angles de cette figure sont des angles électriques.



Le vecteur espace \underline{i}_s est en retard de l'angle φ par rapport au vecteur espace \underline{v}_s image des tensions statoriques. Le flux magnétisant $\underline{\psi}_\mu$ est en quadrature arrière par rapport à \underline{v}_s .

On note λ l'angle qui repère un point quelconque de l'entrefer de la machine réelle et R le rayon de l'alésage interne du stator. R est confondu avec le rayon moyen de l'entrefer. L désigne la longueur utile de la machine. Avec ces notations, le diagramme vectoriel de la figure D1 et les hypothèses simplificatrices énoncées précédemment permettent de construire les répartitions spatiales de la figure D2. Cette figure est dessinée à l'instant $t=0$ pour un angle mécanique correspondant à une paire de pôles. L'enroulement fictif tournant à répartition spatiale sinusoïdale est représenté sur cette figure, il est caractérisé par sa densité linéique de courant $J_L(\lambda, t)$.



D.1 Appliquer la loi de Laplace à l'élément de courant circulant dans l'arc de longueur $Rd\lambda$ situé à la position λ de la couronne statorique et soumis à l'induction $b(\lambda, t)$. On note dF la force élémentaire produite.

D.2 Calculer la force totale appliquée à l'ensemble des conducteurs statoriques en intégrant sur toute la circonférence. En déduire l'expression du couple électromagnétique de la machine en fonction de ses dimensions géométriques, de l'induction maximale B_M , de la valeur maximale de la densité linéique de courant J_{LM} et de l'angle φ .

D.3 Montrer que la puissance de la machine est donnée par

$$P = \pi R^2 L \frac{\omega}{p} B_M J_{LM} \cos \varphi$$

En pratique, les conducteurs sont placés dans les encoches statoriques. Les dimensions, en millimètres, de la denture statorique sont précisées à la figure D3.

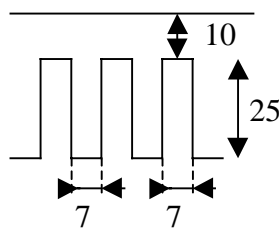


Fig. D3

On considère que, compte tenu de l'épaisseur des isolants et du foisonnement des conducteurs, les encoches sont remplies à 80% de cuivre. La valeur efficace de la densité de courant dans les conducteurs est fixée à 5 A/mm^2 .

Le nombre d'encoche par paire de pôles et par phase est fixé à 2.

D.4 A partir des seules données associées à la figure D3 et du texte qui la suit, déterminer la valeur maximale de la densité linéique de courant J_{LM} de la couronne statorique.

D.5 Après avoir déterminé le nombre total d'encoches, calculer le rayon de l'alésage interne du stator (R).

D.6 Déterminer la longueur utile L de la machine lorsque on se fixe $B_M=0,7T$, et $\cos\phi=0,8$.

D.7 Dessiner le schéma du bobinage triphasé pour un tronçon de stator correspondant à une paire de pôles et en respectant les indications suivantes :

- bobinage en sections,
- ouverture d'une section : 180° électriques (bobinage diamétral),
- deux sections par paire pôles et par phase décalées de 60 degrés électriques connectées en série,
- bobinage double couche (deux faisceaux de conducteurs par encoche).

Utiliser le document réponse 4 en respectant les instructions indiquées sur ce document.

Pour la suite du problème le rayon sera arrondi à $R=1\text{m}$ et la longueur utile de la machine à $L=0,6\text{m}$.

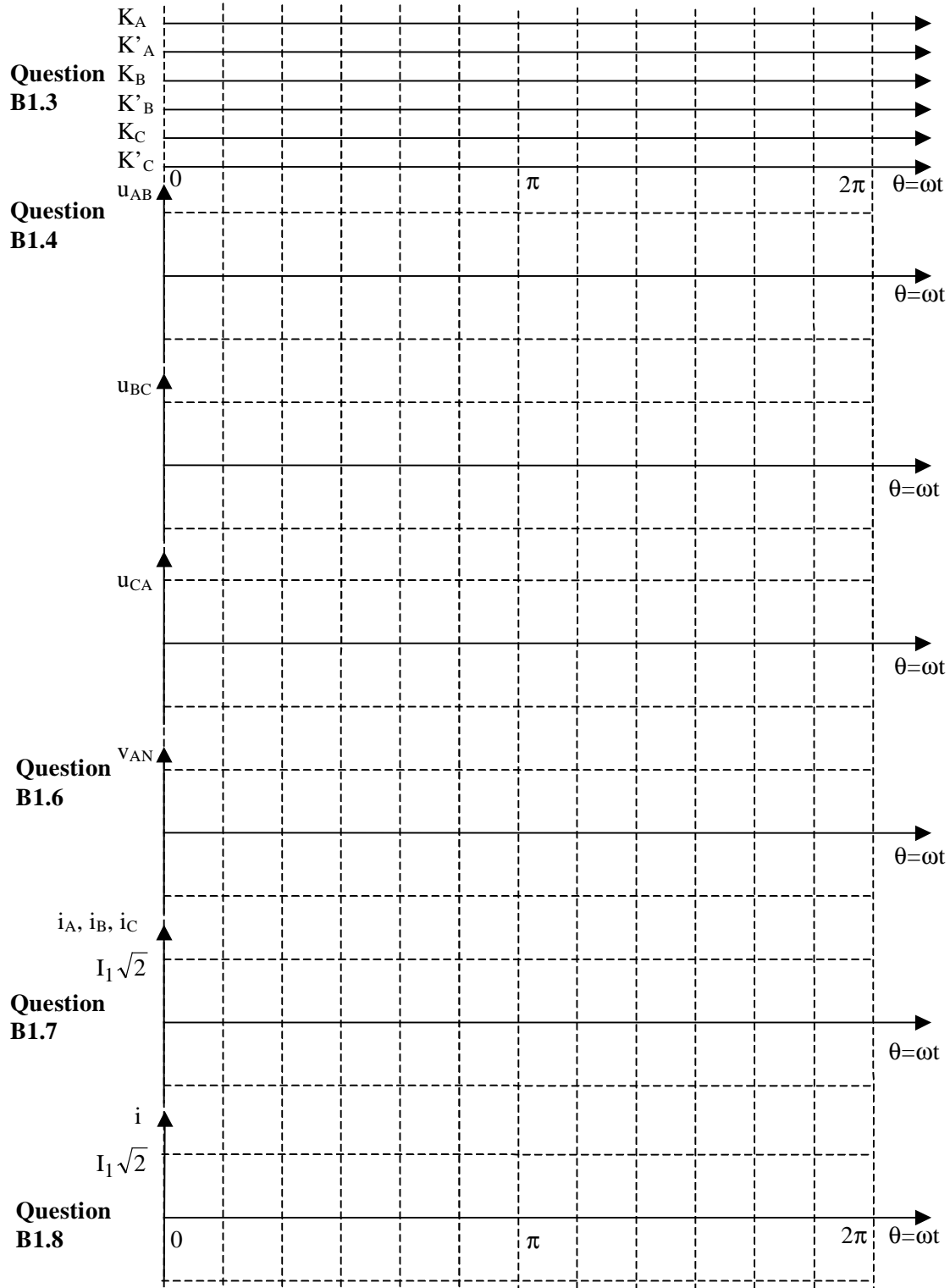
D.8 Déterminer l'expression de la valeur instantanée du flux embrassé par une section du bobinage statorique $\phi(t)$.

D.9 En déduire la valeur efficace V_1 de la tension induite dans chaque spire d'une section du bobinage.

D.10 Tracer le diagramme vectoriel des tensions représentant la connexion en série des deux sections élémentaires de N spires chacune. En déduire le nombre de spires N d'une section si on souhaite appliquer une tension de 230 volts à chaque ensemble de deux sections connectées en série. Les phase de la machine sont constituées de la connexion en parallèle de 70 ensembles de deux sections.

Fin du problème

Document Réponse 1



Document réponse 2

Questions B3.1, B3.2 et B3.3

Rang (n)	fréquence (f)	Vitesse de synchronisme (N_{s_n})	Glissement (g_n)	R_μ	X_μ	X'	R'_R/g_n
1	50 Hz	1500 tr/mn	$-1\% < g_1 < 1\%$	19 Ω	1,3 Ω	0,13 Ω	$ > 0,5 \Omega$

Document réponse 3

Question C2.4

$V_{SF}=230V$, $g=-0,1\%$, $I'_{RF} =$

	P	Q	S	
$R'_R/g, X'$				
R_μ, X_μ				
Total 1				$I_{SF} =$
R_L, X_L				
Total 2				$E_{SF} =$

Retour aux valeurs réelles pour $E_S=235V$

$V_S =$

$I_S =$

$P =$

$Q =$

Question C2.5

$V_{SF}=230V$, $g=-1\%$, $I'_{RF} =$

	P	Q	S	
$R'_R/g, X'$				
R_μ, X_μ				
Total 1				$I_{SF} =$
R_L, X_L				
Total 2				$E_{SF} =$

Retour aux valeurs réelles pour $E_S=235V$

$V_S =$

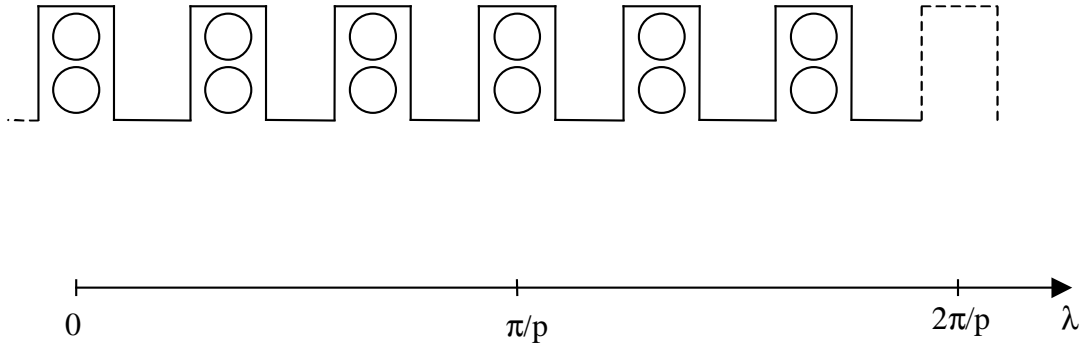
$I_S =$

$P =$

$Q =$

Document réponse 4

Question D.7



Symboles à utiliser

- \otimes Faisceau « aller » d'une section
- \odot Faisceau « retour » d'une section

Les trois phases sont repérées par les lettres A, B et C. Les sections sont repérées par les numéros 1 et 2. Le bobinage complet est donc formé de 6 sections repérées A1, A2, B1, B2, C1, C2.

Pour répondre à cette question, il faut placer les symboles \otimes et \odot dans les cercles de la figure ci dessus et de noter, à droite de chaque faisceau, le repère de la section à laquelle il appartient.