

# ETUDE D'UNE EOLIENNE DE GRANDE PUISSANCE

## Recommandations générales

- Vérifier que le sujet comporte 23 pages + 10 pages en annexe + 4 pages réponses
- L'épreuve de l'**option B** se compose de 5 parties indépendantes. A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. *Le candidat est donc invité à lire rapidement et entièrement l'énoncé avant de commencer à composer afin de bien répartir le temps de composition entre les différentes parties.*
- Les parties A, B, C, D et E 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.

# ETUDE D'UNE EOLIENNE DE GRANDE PUISSANCE

## Sommaire

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SYSTÈME</b> .....	<b>3</b>
NOTATIONS UTILISÉES .....	6
LISTE DES PRINCIPALES GRANDEURS .....	6
<b>PARTIE A : ETUDE DE L'ÉOLIENNE</b> .....	<b>8</b>
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	9
CALCUL DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE EMMAGASINÉE DANS L'ENSEMBLE TOURNANT.....	9
CALCUL DE L'ÉNERGIE RÉCUPÉRABLE PAR L'ÉOLIENNE .....	10
<b>PARTIE B : ETUDE DU FONCTIONNEMENT DE LA GÉNÉRATRICE</b> .....	<b>11</b>
HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES .....	11
FONCTIONNEMENT À ROTOR EN COURT – CIRCUIT (SIMPLE ALIMENTATION) .....	11
FONCTIONNEMENT EN DOUBLE ALIMENTATION.....	12
<b>PARTIE C : LA CONNEXION AU RÉSEAU</b> .....	<b>15</b>
TRANSFORMATEUR.....	15
DISJONCTEUR Q2 .....	15
HABILITATION ÉLECTRIQUE.....	16
<b>PARTIE D : LE CONVERTISSEUR STATIQUE AC-AC</b> .....	<b>17</b>
ETUDE DU CONVERTISSEUR .....	19
COMMANDE DES INTERRUPTEURS .....	21
<b>PARTIE E : LA COMMANDE DU CONVERTISSEUR STATIQUE</b> .....	<b>24</b>
L'ONDULEUR 1.....	25
L'ONDULEUR 2.....	26
FIN DU PROBLÈME .....	26

# Présentation générale du système

## Eolienne Haute performance NORDEX S77/1500kW

### **Rotor**

Le rotor se compose de trois pales en plastique renforcé de fibres de verre (GFK), d'un moyeu, de couronnes d'orientation et d'entraînements pour le calage des pales.

### **Train d'entraînement**

Le train d'entraînement est composé de l'arbre du rotor, du multiplicateur, d'un couplage élastique à cardan et de la génératrice.

### **Le multiplicateur**

Le multiplicateur est un engrenage planétaire à deux étages avec un étage à roue dentée droite. Le système de refroidissement consiste en un circuit à capacité de refroidissement graduelle.

### **Génératrice**

La génératrice est de type asynchrone à double alimentation. La génératrice est maintenue à une température de fonctionnement optimale grâce au circuit de refroidissement.

### **Refroidissement et filtration**

Le multiplicateur, la génératrice et le convertisseur ont des systèmes de refroidissement actifs indépendants les uns des autres. Le refroidissement du multiplicateur, de la génératrice et du convertisseur s'effectue par un circuit d'eau qui garantit des températures de fonctionnement optimales par n'importe quel temps.

### **Système de freinage**

Trois pales indépendantes, dont le dispositif de commande est double, se calent obliquement à la direction du vent par le système de freinage aérodynamique. De plus, le frein hydraulique à disque assiste le processus de freinage en cas d'arrêt d'urgence.

### **Orientation**

La direction du vent est en permanence mesurée par deux girouettes à hauteur du moyeu. En cas de dépassement par rapport à l'écart admissible, la nacelle est orientée par l'intermédiaire de deux moteurs.

### **Commande et raccordement au réseau**

Les éoliennes sont munies de deux anémomètres. Un anémomètre sert à la commande, le second surveille le premier. Sur un moniteur de contrôle placé dans l'armoire électrique, toutes les données d'exploitation peuvent être contrôlées, et diverses fonctions peuvent être commandées. Les données et signaux pour la surveillance à distance des données sont transmis par liaison RNIS. L'exploitant peut télécharger sur Internet, d'un simple clic de souris, toutes les données significatives de l'éolienne. Le logiciel de communication approprié ainsi que les cartes d'acquisition sont fournis par Nordex.

### **Caractéristiques :**

- Diamètre de rotor : 77 m avec 3pales
- Vitesse de rotation : 9,6 à 17,3 t/mn
- Puissance nominale : 1500 kW (pour un vent de 13 m/s)
- Vent de démarrage : 3 m/s
- Poids 88 000 kg (sans la tour)





<http://www.nordex-online.com>

**Remerciements :**

L'auteur remercie la société **Nordex** pour la fourniture des données numériques qui ont permis la réalisation de ce sujet.

## Notations utilisées

- lettre minuscule: valeur électrique instantanée
- 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  $x$  (temporelle) sur une période de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).
- la notation  $\langle x \rangle(\omega t) = X \cdot \sin(\omega t)$  désigne la variation sinusoïdale (d'amplitude  $X$  et de pulsation  $\omega$ ) de la valeur moyenne de la variable  $x$  sur une période de MLI.
- la notation  $\hat{X}$  désigne la valeur crête de la variable.

## Liste des principales grandeurs

- $\cos \varphi'$  (déphasage entre  $i_i$  et  $e_i$ )
- $\cos \varphi_{10}$  (déphasage entre  $I_{10}$  et  $V_s$ )
- $\cos \varphi_1$  (déphasage entre  $I_1$  et  $V_s$ )
- $\cos \varphi_r$  (déphasage entre  $I_r$  et  $V_r$ )
- $C_p$  le coefficient de puissance tel que la puissance récupérée  $P_r = C_p P_p$
- $E = 1/2 m_a V^2$  : énergie cinétique, exprimée en J
- $E_r$ : tension efficace de la fem aux bornes des enroulements rotoriques, exprimée en V
- $e_a, e_b$  et  $e_c$  : tensions délivrées par le secondaire du transformateur (a, b, c), exprimés en V
- $e_a', e_b'$  et  $e_c'$  : tensions dans le rotor (fem) de la machine asynchrone (a', b', c'), exprimés en V
- $f_r$  : fréquence des courants et des tensions rotoriques, exprimée en Hz.
- $f_s$  : fréquence des courants et des tensions statoriques, exprimée en Hz.
- $g$  : glissement relatif du rotor vis à vis du champ tournant ( $g = (n_s - n)/n_s$ )
- $i$  : indice valant a, b ou c
- $i'$  : indice valant a', b' ou c'
- $i_a, i_b$  et  $i_c$  : courants dans le secondaire du transformateur (a, b, c), exprimés en A
- $i_a', i_b'$  et  $i_c'$  : courants dans le rotor de la machine asynchrone (a', b', c'), exprimés en A
- $i_0$  : courant continu à la sortie de l'onduleur 1, exprimé en A
- $i_0'$  : courant continu à l'entrée de l'onduleur 2, exprimé en A
- $I_r$  : valeur efficace du courant rotorique, exprimé en A
- $j$  : opérateur complexe
- $I_{10}$  : valeur efficace du courant statorique pour un fonctionnement entraîné à vitesse de synchronisme, exprimé en A
- $I_1$  : valeur efficace du courant statorique, exprimé en A
- $I_2$ : valeur efficace du courant rotorique ramené au stator, exprimé en A
- $I_c$  : courant continu dans le collecteur d'un IGBT, exprimé en A
- $I_k$  : courant à vide relatif d'un transformateur, exprimé en A
- $J_m$  : moment d'inertie du moyeu de l'éolienne, exprimé en  $\text{kg.m}^2$
- $J_p$  : moment d'inertie des 3 pales de l'éolienne, exprimé en  $\text{kg.m}^2$
- $J_r$  : moment d'inertie du rotor de la génératrice, exprimé en  $\text{kg.m}^2$
- $J_T$  : moment d'inertie total de cet ensemble tournant ramené sur l'axe de la génératrice, exprimé en  $\text{kg.m}^2$
- $m$  : nombre de spires rotoriques par enroulement / nombre de spires statoriques par enroulement
- $m_a$  : masse de l'air se déplaçant à la vitesse  $V$  à travers la surface  $S$ , exprimée en kg
- $m_e$  : masse d'une pale, exprimée en kg
- $n_e, N_e, \Omega_e$  : vitesse du rotor de l'éolienne, exprimée respectivement en t/s, t/mn et en rd/s

- $n, N, \Omega$  : vitesse du rotor de la machine asynchrone, exprimée respectivement en t/s, t/mn et en rd/s
- $n_s, N_s, \Omega_s$  : vitesse du champ tournant de la machine asynchrone exprimée respectivement en t/s, t/mn et en rd/s
- $P_m$  : puissance mécanique fournie par l'éolienne au niveau de l'arbre de la génératrice, exprimée en W
- $P_p$  : puissance éolienne soumise à l'éolienne, exprimée en W
- $P_r$  : puissance récupérée par l'éolienne, exprimée en W
- $P_s$  : puissance électrique au stator, exprimée en W
- $P_{UN}$  : puissance électrique utile nominale, exprimée en W
- Rapport de multiplication de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est de :  $104,2 = \frac{N}{N_e}$
- $R_1$  : résistance d'un enroulement statorique, exprimée en  $\Omega$
- $R_2$  : résistance équivalente d'un enroulement rotorique (ramenée au stator), exprimée en  $\Omega$
- $R_r$  : résistance d'un enroulement rotorique, exprimée en  $\Omega$
- $R_{thjc}$  : résistance thermique jonction-boîtier d'un IGBT, exprimée en  $^{\circ}C/W$
- $S$  : surface balayée par l'éolienne, exprimée en  $m^2$
- $T_{case}$  : température du boîtier d'un IGBT, exprimée en  $^{\circ}C$
- $t_1, t_2, t_3$  : temps d'application des configurations en commande vectorielle pour un onduleur, exprimée en s
- $T_{MLI}$  : période de la MLI (à Modulation de Largeur d'Impulsions), exprimée en s
- $U_{DC}$  : tension du bus continu, exprimée en V
- $U_k$  : tension de court-circuit relative d'un transformateur, exprimée en V
- $\vec{V}$  : vecteur tension possédant une amplitude  $V$  et une phase  $\varphi$  vis-à-vis d'une origine de phase
- $V$  : vitesse du vent, exprimée en m/s
- $V_{CES}$  : tenue en tension directe collecteur-émetteur avec la tension grille-émetteur nulle d'un IGBT, exprimée en V
- $V_{CESat}$  : tension directe collecteur-émetteur à l'état saturé d'un IGBT, exprimée en V
- $v_{ino}$  (ou  $v_{i'no}$ ) tension entre le point  $i$  ( $a, b, c$ ) (ou  $i'$  ( $a', b', c'$ )) et  $no$  (potentiel milieu de la source continue), exprimée en V
- $v_{in}$  (ou  $v_{i'n}$ ) tension entre le point  $i$  ( $a, b, c$ ) (ou  $i'$  ( $a', b', c'$ )) et  $n$  (potentiel milieu de la source continue), exprimée en V
- $v_{nno}$  (ou  $v_{n'no}$ ) tension entre le point  $n$  (ou  $i' n'$ ) et  $no$  (potentiel milieu de la source continue), exprimée en V
- $V_o$  : demi-tension de l'alimentation continue de l'onduleur, exprimée en V
- $V_r$  : tension efficace aux bornes des enroulements rotoriques, exprimée en V
- $V_s$  : tension efficace secteur basse tension, exprimée en V
- $V_v$  : amplitude max du vecteur  $\vec{V}$ , exprimée en V
- $V_x$  : tension aux bornes de  $X$ , exprimée en V
- $X$  : inductance magnétisante à 50Hz, exprimée en  $\Omega$
- $\alpha_i$  : rapport cyclique de la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) de la phase  $i$
- $\lambda$  : inductances de fuites du transformateur et  $\lambda'$  inductances de fuites du rotor de la machine asynchrone, exprimées en H
- $\varphi$  : déphasage entre le courant et la tension
- $\delta$  : masse volumique de l'air ( $1,225kg/m^3$ )
- $\rho$  et  $\rho'$  : densité des pales et du moyeu de l'éolienne, exprimée en  $kg/m^3$
- $\omega$  : pulsation des courants et des tensions, exprimée en rd/s

## Partie A : Etude de l'éolienne

La structure de la chaîne cinématique est composée du moteur électrique + d'un multiplicateur mécanique à pignons + 3 pales

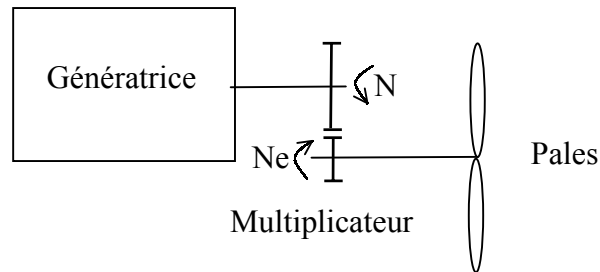


Figure A.1

- Masse d'une pale :  $m_e = 6500 \text{ kg}$
- Rapport de multiplication de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est de :  $104,2 = N/N_e$
- La loi puissance récupérée par les 3 pales en fonction de la vitesse du vent est donnée par la figure A.2 (le rendement du multiplicateur et de la génératrice ne sont pris en compte dans cette figure).

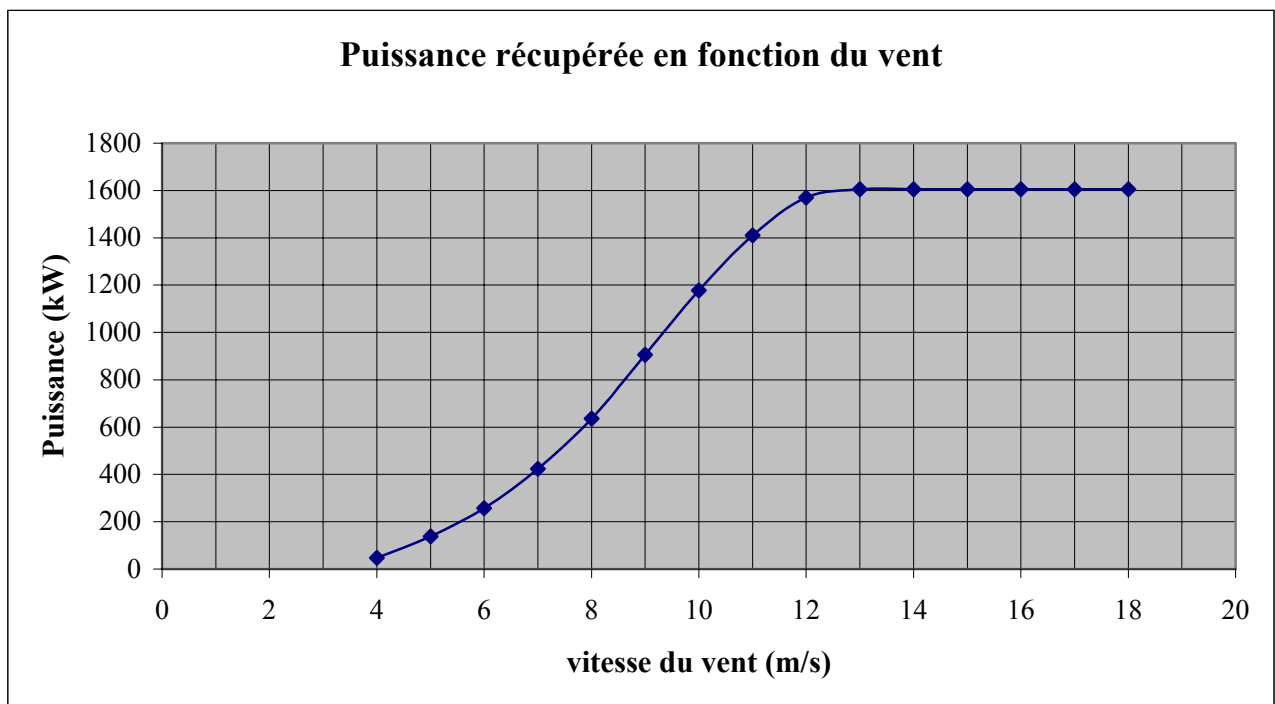


Figure A.2

Vitesse du vent V (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Puissance Pr (kW)	47	138	257	424	636	905	1177	1410	1570	1605	1605	1605	1605	1605	1605

## Principe de fonctionnement

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique de l'air.

$$E = 1/2 m_a \cdot V^2$$

avec  $V$  la vitesse du vent (m/s) et  $m_a$  la masse de l'air se déplaçant à la vitesse  $V$  à travers la surface ( $S$ ) balayée par l'éolienne.

**Q.A.1.** Soit  $\delta$  la masse volumique de l'air ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ), exprimer la masse  $m_a$  passant dans la section ( $S$ ) balayée par l'éolienne (dépend du temps  $t$ )

**Q.A.2.** Ainsi, exprimer l'énergie cinétique de cette masse  $m_a$  vue de l'éolienne en fonction de  $\delta$ ,  $S$ ,  $V$  et  $t$

**Q.A.3.** A partir de l'énergie cinétique de la masse  $m_a$  de l'air, exprimer la puissance éolienne  $P_p$  soumise à l'éolienne

**Q.A.4.** Le rendement de l'éolienne n'est pas égal à 1. On définit le coefficient de puissance  $C_p$  tel que la puissance récupérée  $P_r = C_p \cdot P_p$

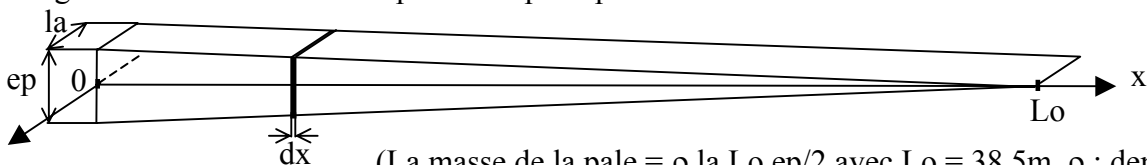
D'après la caractéristique du constructeur, tracer sur le document réponse **REP.A.1.** la variation de  $C_p$  en fonction de  $V$  (la vitesse du vent)

## Calcul de l'énergie cinétique emmagasinée dans l'ensemble tournant.

Lorsque l'éolienne est en pleine vitesse, il est important de connaître l'énergie emmagasinée dans l'ensemble tournant pour le dimensionnement du système de freinage. Pour simplifier l'étude, seuls seront pris en compte l'inertie des 3 pales de l'éolienne, du moyeu des pales et celle du rotor de la génératrice. (L'inertie du multiplicateur de vitesse et des arbres de transmission sont inclus dans le moyeu des pales et dans le rotor de la génératrice.)

- Pour l'inertie d'une pale, on considérera une poutre homogène de section rectangulaire de largeur constante et d'épaisseur continûment variable (de forme triangle) et de longueur de 38,5 m ayant une masse de 6500 kg.

Pour le calcul de l'inertie d'une pale, prendre comme hypothèse que le volume élémentaire d'intégration est la section de la pale multipliée par  $dx$ .

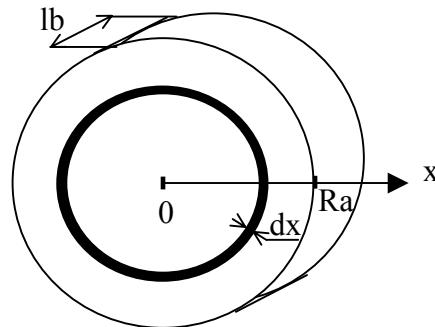


(La masse de la pale =  $\rho \cdot la \cdot Lo \cdot ep / 2$  avec  $Lo = 38,5 \text{ m}$ ,  $\rho$  : densité)

- Pour l'inertie du moyeu des pales, on considérera un cylindre homogène de 2 m de diamètre ayant une masse de 19500 kg.

Pour le calcul de l'inertie d'un cylindre homogène, prendre comme hypothèse que le volume élémentaire d'intégration est le tube d'épaisseur  $dx$ .

(La masse du moyeu =  $\rho' \cdot \pi \cdot Ra^2 \cdot lb$  avec  $Ra = 1 \text{ m}$ )  
( $\rho'$  : densité)



- Pour l'inertie de la génératrice asynchrone, on considérera que le rotor est un cylindre homogène de 0,66 m de diamètre ayant une masse de 3200 kg.

- Q.A.5.** Calculer le moment d'inertie  $J_r$  du rotor de la génératrice
- Q.A.6.** Calculer l'énergie cinétique emmagasinée dans le rotor de la machine asynchrone correspondant à une vitesse de l'éolienne de 17,3 t/mn
- Q.A.7.** Calculer le moment d'inertie  $J_m$ , par rapport à l'axe de rotation, du moyeu de l'éolienne
- Q.A.8.** Calculer le moment d'inertie  $J_p$ , par rapport à l'axe de rotation, des 3 pales de l'éolienne
- Q.A.9.** Calculer l'énergie cinétique emmagasinée dans l'ensemble des 3 pales et du moyeu pour une vitesse de l'éolienne de 17,3 t/mn
- Q.A.10.** Calculer l'énergie cinétique totale emmagasinée dans cet ensemble tournant correspondant à une vitesse de l'éolienne de 17,3 t/mn
- Q.A.11.** Calculer le moment d'inertie total  $J_T$  de cet ensemble tournant ramené sur l'axe de la génératrice
- Q.A.12.** En considérant une puissance de freinage constante de 1600kW, combien de temps durerait le temps de freinage pour évacuer l'équivalent de cette énergie cinétique emmagasinée dans cet ensemble tournant.

### Calcul de l'énergie récupérable par l'éolienne

Chacun sait que le vent n'est pas une source d'énergie constante et permanente. Selon le site où l'éolienne est implantée, elle permet de fournir plus ou moins d'énergie pour un temps donné.

On se propose de calculer l'énergie récupérée par cette éolienne sur le site de Pierrelatte (vallée du Rhône) pendant une année.

Pour cela il est nécessaire de connaître l'histogramme de la vitesse du vent pour ce site. La figure A.3 suivante donne cet histogramme.

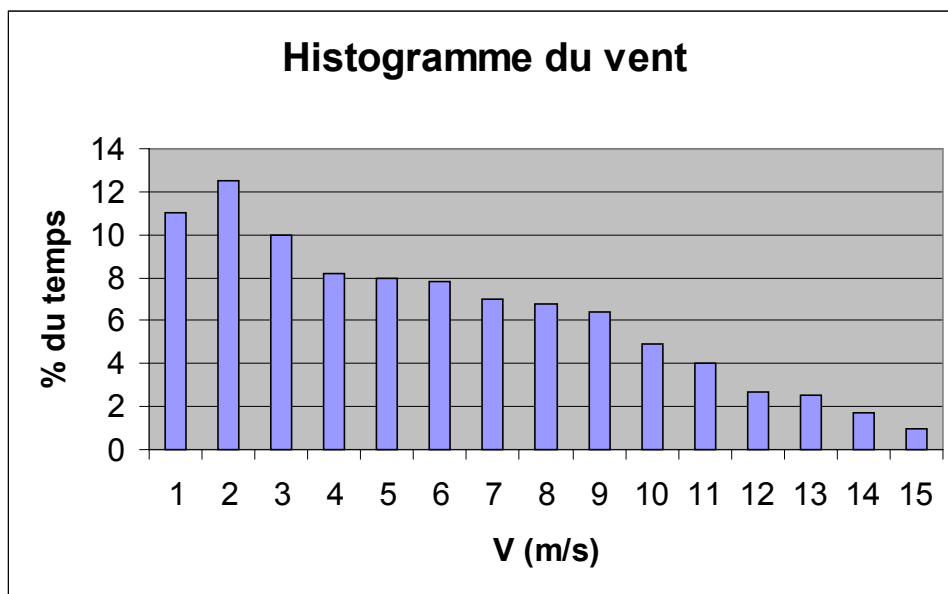


Figure A.3

% du temps	11	12,5	10	8,2	8	7,8	7	6,8	6,6	5	4,1	2,9	2,5	1,7	1
V (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

- Q.A.13** Calculer l'énergie récupérable par cette éolienne sur le site de Pierrelatte pour une année (365j)

## Partie B : Etude du fonctionnement de la génératrice

### Hypothèses simplificatrices

- Pour simplifier l'étude analytique, les pertes mécaniques et les pertes fer de la machine seront supposées négligeables.
- Pour les pertes mécaniques du multiplicateur de vitesse, on considérera le rendement de cet ensemble constant et égal à 98 %.

### Fonctionnement à rotor en court – circuit (simple alimentation)

#### Caractéristiques électriques de la machine asynchrone

Ces caractéristiques sont définies par le constructeur lorsque la machine asynchrone fonctionne en génératrice (convention génératrice).

- 4 pôles, rotor bobiné en court-circuit, couplage étoile des enroulements statoriques
- puissance électrique nominale :  $P_{UN}=1500$  kW

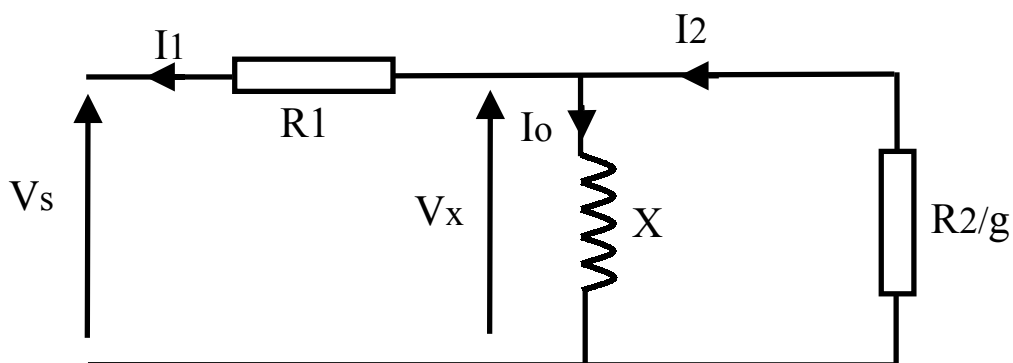


Figure B.1 : Schéma équivalent simplifié par enroulement de la machine asynchrone en fonctionnement génératrice en régime permanent ( $g < 0$ ) rotor en court-circuit.

Avec

- $R1 = 0,0031\Omega$  : résistance d'un enroulement statorique
- $X = 1\Omega$  : inductance magnétisante à 50Hz
- $R2 = 0,003\Omega$  : résistance équivalente d'un enroulement rotorique (ramenée au stator)
- $g$  : glissement relatif du rotor vis à vis du champ tournant ( $g = (ns-n)/ns$ )
- la puissance dans  $R2/g$  représente la puissance transmise du rotor vers le stator

$$V_s = 400V - 50 Hz$$

- Q.B.1.** Pour le fonctionnement entraîné à vitesse de synchronisme, calculer la valeur efficace du courant statorique  $I_{10}$
- Q.B.2.** Pour le fonctionnement entraîné à vitesse de synchronisme, calculer la valeur du  $\cos \varphi_{10}$  (déphasage entre  $I_{10}$  et  $V_s$ )
- Q.B.3.** Pour le fonctionnement nominal (puissance utile = 1500kW), calculer la valeur efficace du courant statorique  $I_1$ , sachant que pour ce schéma simplifié  $\cos \varphi_1 = 0,9507$
- Q.B.4.** Pour le fonctionnement nominal, calculer la valeur efficace de la tension  $V_x$
- Q.B.5.** Pour le fonctionnement nominal, calculer la valeur de  $g$
- Q.B.6.** Pour le fonctionnement nominal, en déduire la vitesse de rotation de la génératrice (t/mn)
- Q.B.7.** En déduire la plage de vitesse de rotation du rotor de l'éolienne lorsque la valeur du glissement varie de  $g=0$  à la valeur de  $g$  nominal
- Q.B.8.** Calculer le couple au niveau du rotor de l'éolienne lorsque la puissance électrique est nominale ( $P_{UN}=1500kW$ )

## Fonctionnement en double alimentation

Le rotor de la machine asynchrone est maintenant connecté à une source triphasée (convertisseur statique AC – AC) qui permet d'imposer une amplitude de tension et une fréquence ( $f_r$ ) aux enroulements du rotor. Le schéma de principe est donné par la figure B.2.

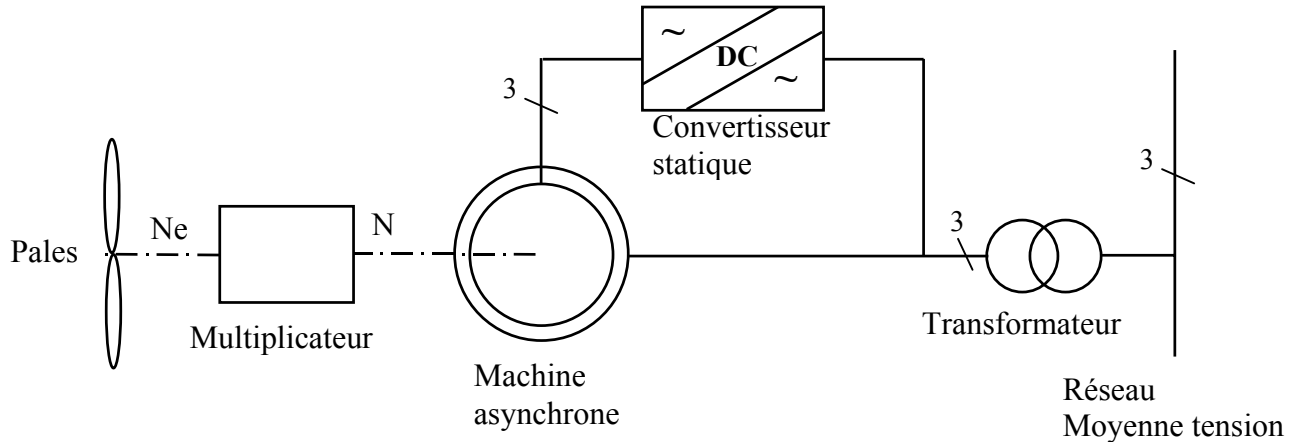


Figure B.2

Pour l'étude de la machine asynchrone, la figure B.3 donne un schéma simplifié, valable en régime permanent, d'un enroulement statorique (couplage étoile) et d'un enroulement rotorique (couplage étoile). La puissance mécanique n'est pas représentée dans ce schéma.

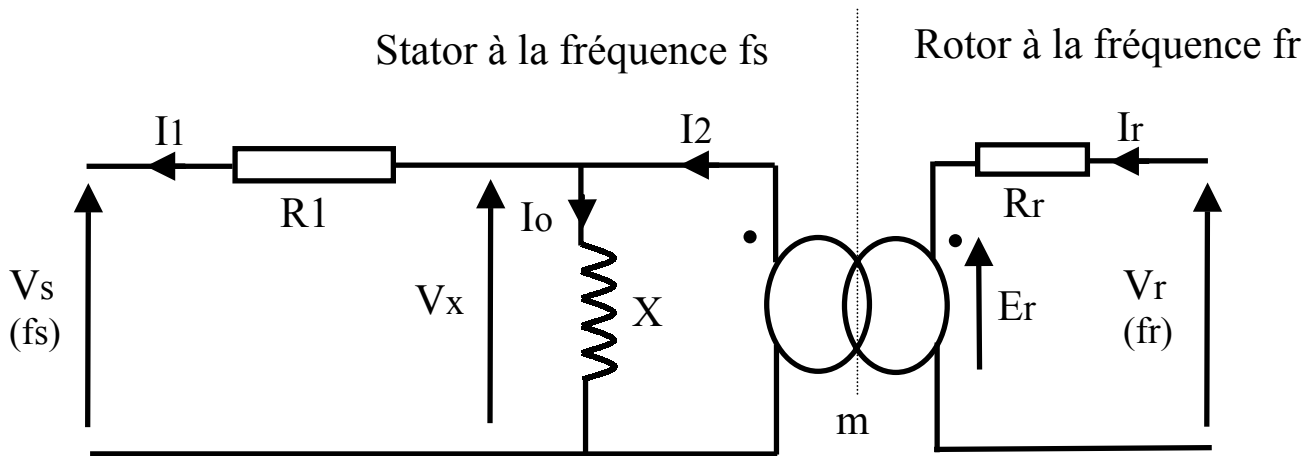



Figure B.3 : Schéma électrique simplifié par enroulement de la machine asynchrone en fonctionnement génératrice en régime permanent ( $g < 0$ ) avec une double alimentation.

Avec

- $R_1 = 0,0031\Omega$  : résistance d'un enroulement statorique
- $X = 1\Omega$  : inductance magnétisante
- $R_r$  : résistance d'un enroulement rotorique

 : circuit magnétique couplé entre les enroulements statoriques et rotoriques avec un rapport de nombre de spires  $m$  (nombre de spires rotoriques par enroulement / nombre de spires statoriques par enroulement)

$$V_s = 400V - 50 Hz$$

## Etude générale

Attention aux signes, sachant que les valeurs efficaces et les fréquences sont toujours positives.

- Q.B.9.** Pour un fonctionnement à vitesse lentement variable de la machine asynchrone, donner l'expression littérale de la valeur efficace de  $E_r$  en fonction de  $V_x$ ,  $m$  et  $g$
- Q.B.10.** Calculer le rapport  $m$  tel que  $E_r = V_x$  pour une vitesse de 900 t/mn
- Q.B.11.** Pour un fonctionnement à vitesse lentement variable de la machine asynchrone entre 1000 et 1800t/mn, tracer sur le document réponse **REP.B.1**, la tension efficace  $E_r$  en fonction de la vitesse de la machine asynchrone (on supposera la chute de tension dans  $R_1$  négligeable et donc  $V_x=400V$ )
- Q.B.12.** Pour un fonctionnement à vitesse lentement variable de la machine asynchrone, donner l'expression littérale de  $f_r$  en fonction de  $f_s$  et  $g$
- Q.B.13.** Pour un fonctionnement à vitesse variable de la machine asynchrone entre 1000 et 1800t/mn, tracer sur le document réponse **REP.B.1**, la valeur numérique de la fréquence rotorique  $f_r$  en fonction de la vitesse de la machine asynchrone
- Q.B.14.** Pour les vitesses 1200 et 1800 t/mn, la valeur efficace de  $E_r$  et la fréquence  $f_r$  sont identiques. Quelle différence peut-on noter sur les tensions délivrées par le convertisseur statique permettant de distinguer ces deux fonctionnements
- Q.B.15.** Sachant que  $R_2$  est la valeur de  $R_r$  ramenée au stator, calculer  $R_r$

Pour la suite du problème, indépendamment des réponses aux questions **Q.B.10** et **Q.B.15**, prendre  $m = 2,6$  et  $R_r = 0,02 \Omega$ .

Pour réduire l'amplitude du courant dans le transformateur et dans la ligne moyenne tension, on magnétise la machine asynchrone par l'alimentation du rotor.

- Q.B.16.** Pour le fonctionnement sans échange de puissance statorique ( $I_1 = 0$ ), calculer le courant  $I_r$
- Q.B.17.** Pour le fonctionnement sans échange de puissance statorique ( $I_1 = 0$ ) et pour une vitesse de 1000t/mn, calculer la valeur numérique de  $V_r$

## Fonctionnement nominal :

Puissance mécanique fournie par l'éolienne au niveau de l'arbre de la génératrice vaut  $P_m = 1572kW$ , pour une vitesse de 1800t/mn.

- Q.B.18.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer le couple électromagnétique de la machine asynchrone
- Q.B.19.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance transmise par le champ tournant
- Q.B.20.** Pour ce fonctionnement nominal, avec  $\cos \phi_1 = 1$ , calculer la valeur numérique de  $I_1$
- Q.B.21.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance électrique  $P_s$  au stator
- Q.B.22.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer les pertes Joule statoriques
- Q.B.23.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la tension  $V_x$
- Q.B.24.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la valeur numérique de  $I_2$
- Q.B.25.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer les pertes Joule rotoriques
- Q.B.26.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?

- Q.B.27.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance à l'entrée du transformateur (coté basse tension), en considérant le rendement du convertisseur AC-AC égal à 99%
- Q.B.28.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la fréquence de l'alimentation rotorique
- Q.B.29.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la valeur numérique de  $E_r$
- Q.B.30.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance réactive mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.31.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer le  $\cos \varphi_r$  entre  $V_r$  et  $I_r$
- Q.B.32.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la valeur numérique de  $V_r$

**Fonctionnement à puissance réduite :**

Puissance mécanique fournie par l'éolienne au niveau de l'arbre de la génératrice vaut  $P_m = 250\text{kW}$ , pour une vitesse de 1200t/mn.

- Q.B.33.** Pour ce fonctionnement, calculer le couple électromagnétique de la machine asynchrone
- Q.B.34.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance transmise par le champ tournant
- Q.B.35.** Pour ce fonctionnement, avec  $\cos \varphi_1 = 1$ , calculer la valeur numérique de  $I_1$
- Q.B.36.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance électrique  $P_s$  au stator
- Q.B.37.** Pour ce fonctionnement, calculer les pertes Joule statoriques
- Q.B.38.** Pour ce fonctionnement, calculer la tension  $V_x$
- Q.B.39.** Pour ce fonctionnement, calculer la valeur numérique de  $I_2$
- Q.B.40.** Pour ce fonctionnement, calculer les pertes Joule rotoriques
- Q.B.41.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.42.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance à l'entrée du transformateur (en considérant le rendement du convertisseur AC-AC égal à 99%)
- Q.B.43.** Pour ce fonctionnement, calculer la valeur numérique de  $E_r$
- Q.B.44.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance réactive mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.45.** Pour ce fonctionnement, calculer le  $\cos \varphi_r$  entre  $V_r$  et  $I_r$
- Q.B.46 .** Pour ce fonctionnement, calculer la valeur numérique de  $V_r$

## Partie C : La connexion au réseau

La génératrice asynchrone, est connectée au réseau HTA (20kV) via un transformateur des appareils de protection et de coupure.

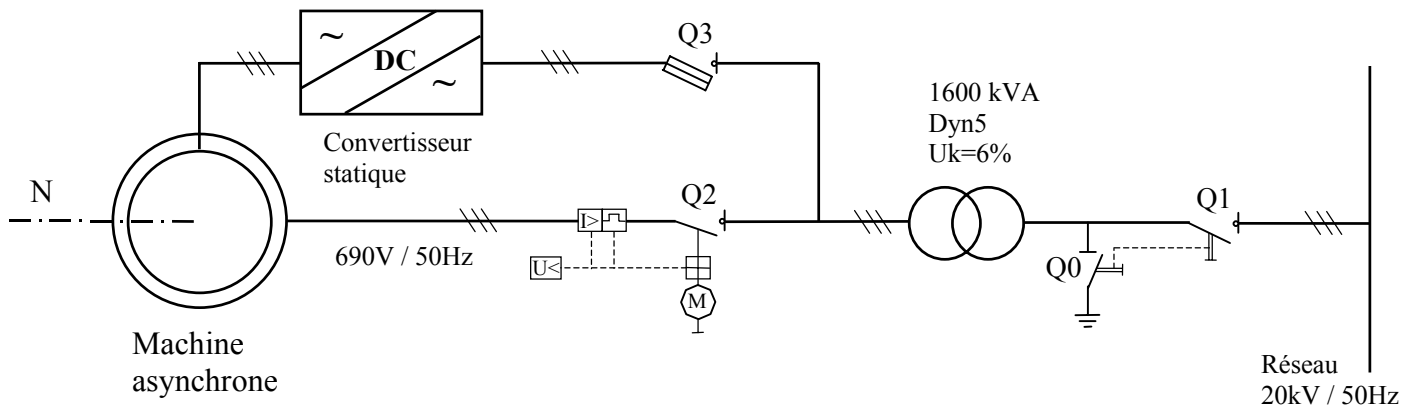


Figure C.1

- Caractéristiques du transformateur :

- . puissance apparente nominale de 1600 kVA
- . couplage Dyn5
- . pertes à vide de 1700W
- . pertes cuivre nominales de 20 kW
- . tension de court-circuit relative  $U_k = 6\%$
- . courant à vide relatif  $I_k = 3\%$

### Transformateur

- Q.C.1.** Donner la signification du couplage Dyn5
- Q.C.2.** Donner le schéma équivalent (ramené coté basse tension) du transformateur avec les valeurs numériques de chaque paramètre du modèle
- Q.C.3.** En cas de court-circuit entre deux phases du stator de la machine asynchrone, calculer le courant de court-circuit présumé (coté basse tension) en ne tenant compte que des impédances du transformateur (les autres impédances sont négligées)

### Disjoncteur Q2

- Q.C.4.** Quelle protection assure le sigle  $I >$ , protège t-elle la machine ou/et le transformateur ou/et les câbles ou/et autres
- Q.C.5.** Quelle protection assure le sigle  $U <$ , protège t-elle la machine ou/et le transformateur ou/et les câbles ou/et autres
- Q.C.6.** Quelle protection assure le sigle  $\Delta L$ , protège t-elle la machine ou/et le transformateur ou/et les câbles ou/et autres
- Q.C.7.** D'après la documentation Legrand en annexe 1, définir le choix du disjoncteur Q2 (référence, calibre et auxiliaires de commande)

## **Habilitation électrique**

**Q.C.8.** Qui a besoin d'une habilitation électrique ?

**Q.C.9.** Qui prend la responsabilité de délivrer une habilitation électrique ?

**Q.C.10.** Pour la basse tension < à 1000V il existe principalement 5 types d'habilitation (B0, B1, B2 Br et BC), donner le titre (ou fonction) de ces 5 habilitations en précisant si ils ont ou pas le droit d'exécuter des opérations d'ordre électrique.

**Q.C.11.** Que signifie VAT ?

**Q.C.12.** Lors d'une intervention sous tension avec voisinage, quels équipements de protection individuel (EPI) doit posséder l'exécutant électricien ?

## Partie D : Le convertisseur statique AC-AC

Le convertisseur statique est constitué de 2 onduleurs à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) AC-DC avec la partie DC commune (tension continue  $2.V_0$ ). Le schéma du convertisseur est donné par la figure D.1 où les notations et conventions de signe sont définies (*lettre minuscule : valeur électrique instantanée*).

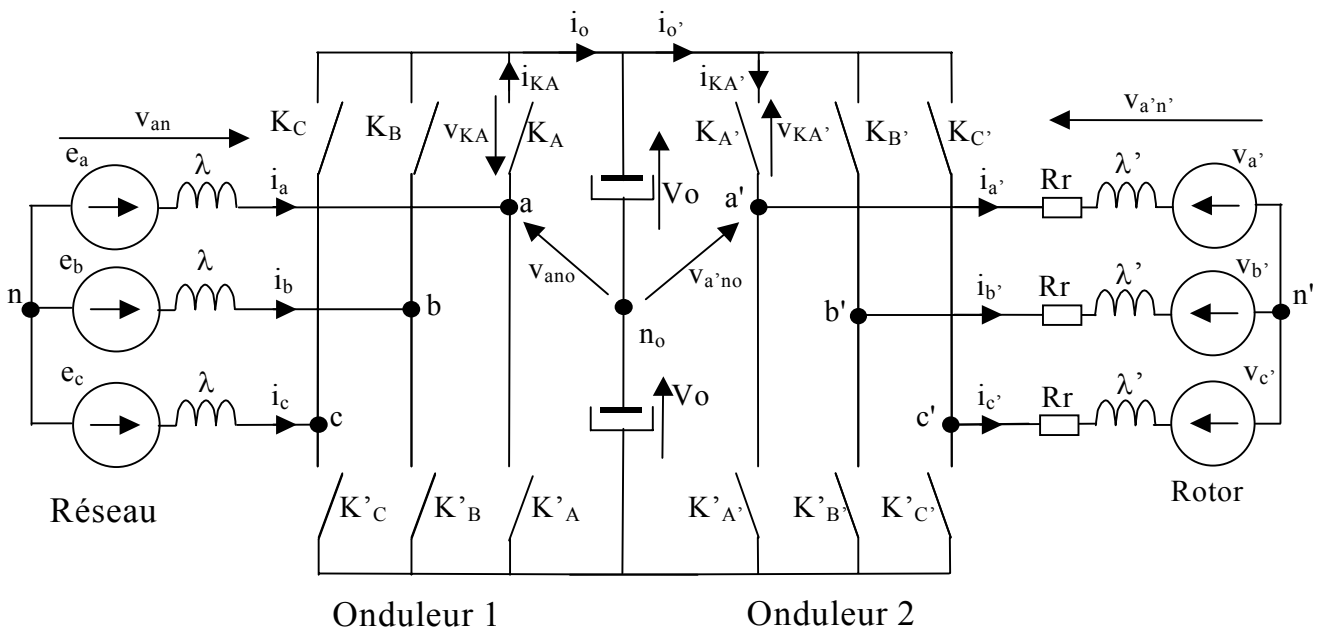


figure D.1

Ce convertisseur comprend 6 bras dont chaque interrupteur est composé d'un IGBT avec une diode de roue libre.

Pour l'étude qui suit, on considérera que :

- Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.
- les courants  $(i_a, i_b, i_c)$  et  $(i_{a'}, i_{b'}, i_{c'})$  sont parfaitement sinusoïdaux et d'amplitude crête  $\hat{I}$  et  $\hat{I}'$ .

- le système triphasé  $(e_a, e_b, e_c)$  représente le réseau avec une valeur efficace constante égale à 400V (tension simple) et une fréquence de 50Hz.
- le système triphasé  $(e_{a'}, e_{b'}, e_{c'})$  représente la tension aux bornes du rotor avec une valeur efficace et une fréquence variables. Les courants rotoriques  $(i_{a'}, i_{b'}, i_{c'})$  varient, en valeur efficace, entre 150 et 430A, avec un déphasage variable tel que le  $\cos \varphi'$  peut être positif ou négatif selon le fonctionnement de l'éolienne.
- Les sources  $(e_a, e_b, e_c)$  (liées à l'onduleur 1) sont représentées avec la convention générateur et les sources  $(e_{a'}, e_{b'}, e_{c'})$  (liées à l'onduleur 2) sont représentées avec la convention récepteur.
- $\lambda$  inductances de fuites du transformateur et  $\lambda'$  inductances de fuites du rotor de la machine asynchrone.
- $R_r$  résistances des enroulements rotoriques de la machine asynchrone.

## Etude du convertisseur

Chaque interrupteur électronique est repéré par un symbole ( $K_A, K'_A, K_B, \dots$ ), le même symbole désigne aussi sa variable logique de commande ( $K_A=1$  signifie que l'interrupteur  $K_A$  est fermé et  $K_A=0$  signifie que l'interrupteur  $K_A$  est ouvert). On a toujours une commande complémentaire pour chaque bras ( $K_A \neq K'_A, K_B \neq K'_B, \dots$ ).

La commande MLI (à Modulation de Largeur d'Impulsions) permet de délivrer une tension ( $v_{ino}$ ) (ou  $v_{i'no}$ ) entre le point  $i$  (a, b, c) (ou  $i'$  (a', b', c')) et no (potentiel milieu des sources continues) ayant la forme représentée par la figure D.2.

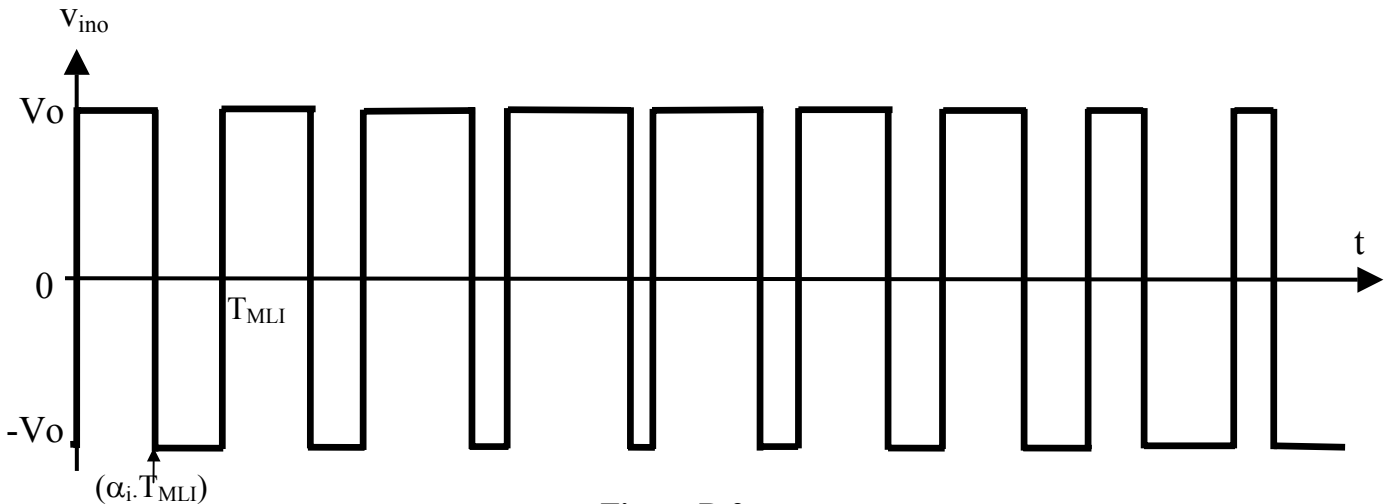


Figure D.2

- Notation :  $\langle x \rangle$  désigne la valeur moyenne de la variable  $x$  (temporelle) sur une période de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).

La façon d'obtenir la commande des interrupteurs sera abordée dans la suite du sujet.

On considère, pour les premières questions, que c'est la stratégie de **commande à MLI simple** qui est utilisée pour les deux onduleurs. C'est à dire la tension  $\langle v_{nno} \rangle$  (et  $\langle v_{n'no} \rangle$ ) vis à vis de  $T_{MLI}$  vaut zéro.

Pour les 8 premières questions, les résistances  $R_r$  sont négligées ( $R_r = 0$ ).

- Q.D.1.** Pour l'onduleur 1, exprimer de façon littérale la relation entre  $v_{ino}$ ,  $v_{in}$  et  $v_{nno}$  ( $i = a, b$  ou  $c$ )
- Q.D.2.** Sachant que  $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$ , exprimer de façon littérale la relation de  $v_{nno}$  en fonction de  $v_{ano}, v_{bno}, v_{cno}$
- Q.D.3.** Exprimer de façon littérale les relations de  $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$  en fonction de  $v_{ano}, v_{bno}, v_{cno}$
- Q.D.4.** Exprimer  $\langle v_{ino} \rangle$  en fonction de  $\alpha_i$  et de  $V_o$
- Q.D.5.** A partir de **Q.D.1** et sachant que  $\langle v_{nno} \rangle = 0$ , donner la relation entre  $\langle v_{in} \rangle$  et  $\langle v_{ino} \rangle$
- Q.D.6.** On désire que  $\langle v_{in} \rangle$  varie de façon sinusoïdale à la fréquence 50 Hz, c'est à dire  $\langle v_{in} \rangle(\omega t) = V \cdot \sin(\omega t)$ . Exprimer de façon littérale la relation de  $\alpha_i$  en fonction de  $V$  et de  $V_o$
- Q.D.7.** Calculer la valeur de  $V_o$ , lorsque que  $\alpha_{i\_max}$  vaut 1 et que  $v_{in}$  ( $\langle v_{in} \rangle(\omega t)$  efficace) vaut 400V (en négligeant la chute de tension aux bornes des inductances  $\lambda$  pour la fréquence de 50 Hz),
- Q.D.8.** Quelle est l'utilité des inductances  $\lambda$  et  $\lambda'$  ?

En pratique, c'est la commande MLI avec  $\langle v_{\text{mno}} \rangle \neq 0$  qui est utilisée, ce qui correspond à une tension continue valant la tension composée crête du réseau  $\sqrt{3} \cdot 400 \cdot \sqrt{2} = 2V_o = 980\text{V}$  (en négligeant la chute de tension aux bornes des inductances  $\lambda$  pour la fréquence de 50 Hz).

La stratégie de commande de l'onduleur 1 est multiple. Sa première fonction est d'assurer le transfert de l'énergie entre le rotor de la machine asynchrone et le réseau. Ce transfert est bidirectionnel (du réseau vers le rotor ou l'inverse) avec des courants de forme sinusoïdale et avec aucun échange de puissance réactive avec le réseau pour minimiser l'amplitude des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ). Sa deuxième fonction est de réguler la tension du bus continu à  $2V_o$ .

La stratégie de commande de l'onduleur 2 est différente. Sa fonction est de délivrer un système de tensions triphasées avec une amplitude et une fréquence qui dépendent du fonctionnement de l'éolienne, avec des courants de forme sinusoïdale et un  $\cos \varphi'$  qui est variable ( $>0$  ou  $<0$ ).

**Pour le fonctionnement de l'éolienne à vide** (ne fournissant aucune énergie mécanique au niveau du rotor de la machine asynchrone) avec une vitesse (coté génératrice) de 1000 t/mn, l'alimentation du rotor (onduleur 2) nécessite une tension simple  $V_{i'n}$  de 355V avec un courant efficace  $i_r$  de 150A servant à la magnétisation de la machine asynchrone et à fournir une puissance active (pertes Joule rotorique) de 1350W.

**Q.D.9.** Calculer  $\cos \varphi'$  (onduleur 2)

**Q.D.10.** Pour  $2V_o = 980\text{V}$ , calculer  $\langle i_o \rangle$  et  $\langle i_o \rangle$

**Q.D.11.** Déterminer  $\cos \varphi$  (onduleur 1)

**Q.D.12.** Pour  $V_{\text{in}}=400\text{V}$ , calculer la valeur efficace  $I_i$  ( $i = a, b$  ou  $c$ ) (courant dans le réseau)

**Pour le fonctionnement de l'éolienne en régime nominal** avec une vitesse (coté génératrice) de 1800 t/mn, la tension simple  $V_{i'n}$  du rotor a une valeur efficace de 200V et le courant efficace  $i_r$  sert à la magnétisation de la machine asynchrone (150A réactif) et au transfert de la puissance active du rotor vers le réseau de 240kW.

**Q.D.13.** Calculer la valeur efficace  $I_r$  ( $r = a', b'$  ou  $c'$ ) (courant dans le rotor)

**Q.D.14.** Calculer  $\cos \varphi'$  en déduire la valeur de  $\varphi'$  en précisant si  $i_r$  est en avance ou en retard sur la tension  $\langle v_{i'n} \rangle(\omega t)$

**Q.D.15.** Pour  $2V_o = 980\text{V}$ , calculer  $\langle i_o \rangle$

**Q.D.16.** Déterminer  $\cos \varphi$

**Q.D.17.** Pour  $V_{\text{in}}=400\text{V}$ , calculer la valeur efficace  $I_i$  ( $i = a, b$  ou  $c$ ) (courant dans le réseau)

### Définitions des composants de puissance

**Q.D.18.** Pour l'onduleur 1, définir pour l'interrupteur  $K_A$  le sens de l'IGBT et de la diode en respectant les notations

**Q.D.19.** Pour l'onduleur 2, définir pour l'interrupteur  $K_A$  le sens de l'IGBT et de la diode en respectant les notations

**Q.D.20.** A partir des deux fonctionnements précédents (que l'on considère comme des fonctionnements extrêmes pour le convertisseur), donner les contraintes maximales que subissent la diode et l'IGBT (courant et tension instantanés) de l'interrupteur  $K_A$

**Q.D.21.** A partir des deux fonctionnements précédents (que l'on considère comme des fonctionnements extrêmes pour le convertisseur), donner les contraintes maximales que subissent la diode et l'IGBT (courant et tension instantanés) de l'interrupteur  $K_A$ .

**Q.D.22.** Calculer le courant moyen dans l'IGBT de l'interrupteur  $K_A$  pour un courant efficace secteur  $I_i = 200A$ , en considérant qu'une alternance complète du courant  $i_i$  passe dans l'IGBT (pour maximiser le courant dans l'IGBT)

**Q.D.23.** A l'aide des questions **Q.D.20** et **Q.D.22**, choisir dans la documentation jointe, en **annexe 2**, le module IGBT de l'onduleur 1 adapté en expliquant les critères de choix et en prenant un IGBT ayant un calibre de courant 50% plus important que le courant moyen calculé dans la question **Q.D.22** pour prendre en compte que le courant n'est pas continu en permanence. Avec :

- $V_{CES}$  : tenue en tension directe collecteur-émetteur avec la tension grille-émetteur nulle
- $I_c$  : courant continu dans le collecteur
- $V_{CESat}$  : tension directe collecteur-émetteur à l'état saturé
- $R_{thjc}$  : résistance thermique jonction-boîtier
- $T_{case}$  : température du boîtier

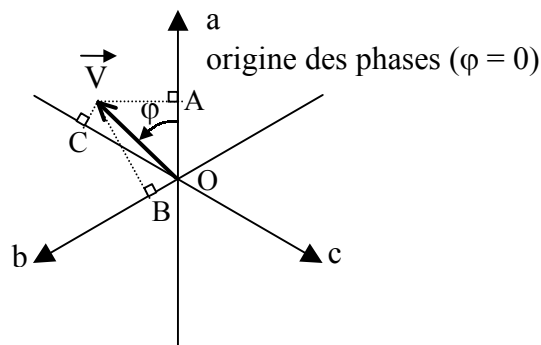
**Q.D.24.** Préciser les origines des pertes dans le convertisseur en précisant les facteurs influants sur ces pertes

## Commande des interrupteurs

La commande des deux onduleurs est réalisée par une commande numérique basée sur la MLI vectorielle.

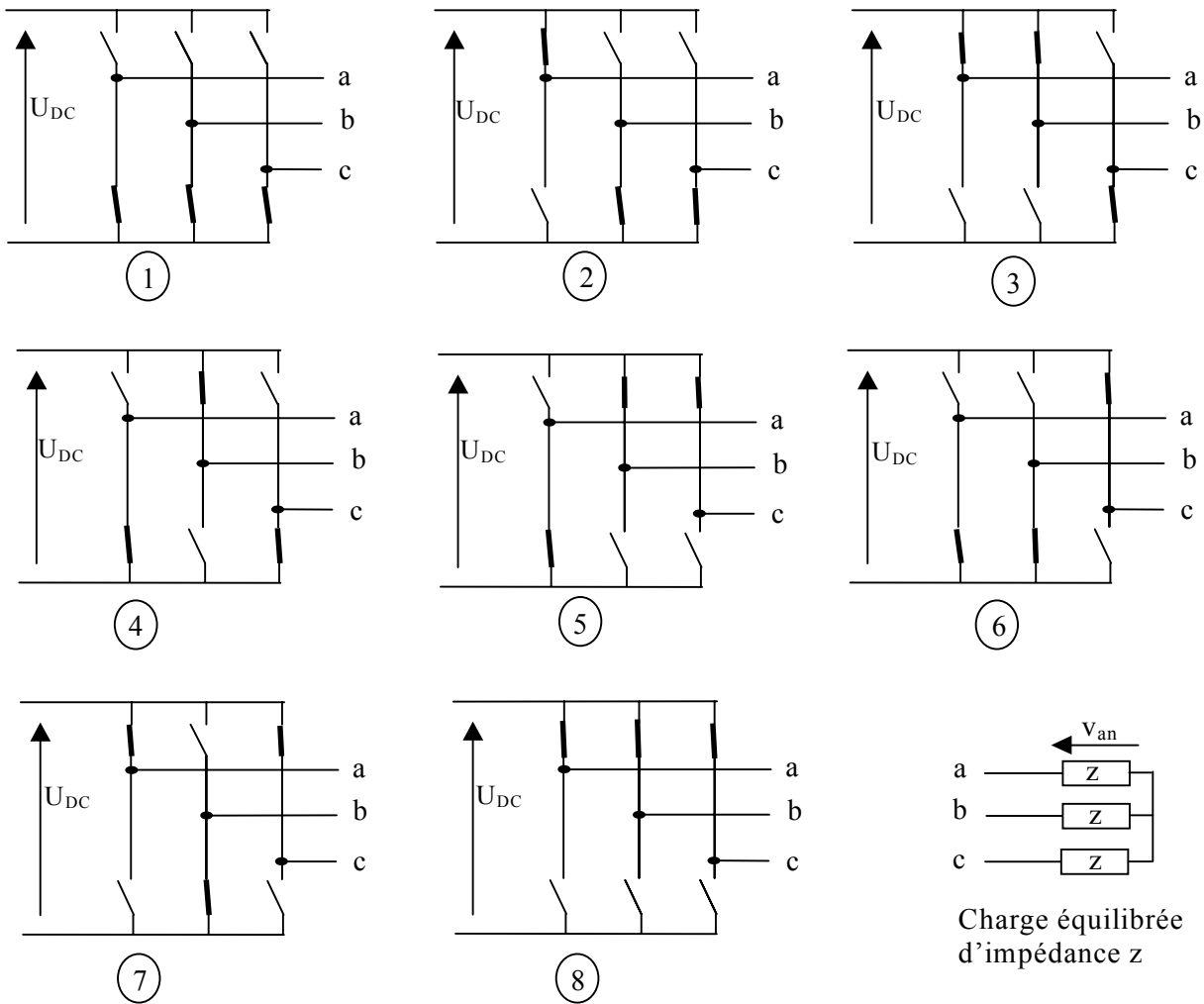
Un système de tensions triphasées équilibrées peut se mettre sous la forme d'un vecteur  $\vec{V}$  possédant une amplitude  $V$  et une phase  $\varphi$  vis-à-vis d'une origine des phases (axe a : origine des phases). La projection de ce vecteur sur un système d'axe triphasé (a,b,c) permet d'obtenir l'amplitude des 3 composantes d'un système triphasé :

- $OA = V \cos(\varphi)$
- $OB = V \cos(\varphi - 2\pi/3)$
- $OC = V \cos(\varphi - 4\pi/3)$



**Figure D.3**

Pour un onduleur, ces 8 configurations sont possibles :



**Figure D.4**

Lorsque l'onduleur est connecté à une charge équilibrée d'impédance  $z$ , chaque tension simple (par exemple :  $v_{an}$ ) est le siège d'une tension qui dépend des 8 configurations ci-dessus et de la tension  $U_{DC}$ .

**Q.D.25.** Calculer pour les 3 premières configurations l'amplitude de  $v_{an}$

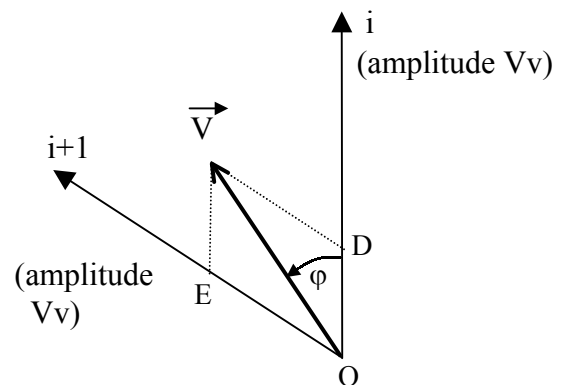
On notera l'amplitude de la tension maximale de  $v_{an} = V_v$  (qui correspond à l'amplitude des vecteurs du document réponse **REP.D.1**).

**Q.D.26.** A partir de ces configurations, compléter le document réponse **REP.D.1** en inscrivant pour les 6 vecteurs le numéro de la configuration associée qui permet d'obtenir ce vecteur

Si le vecteur  $\vec{V}$  se situe entre deux vecteurs des configurations (i) et (i+1) avec une amplitude  $V$  inférieure à  $V_v$ .

La commande d'onduleur, par MLI vectorielle, consiste à appliquer à la sortie de l'onduleur trois vecteurs de tensions lors d'une période MLI ( $T_{MLI}$ ) de façon que sur cette période, la moyenne des 3 vecteurs soit égale au vecteur  $\vec{V}$  initialement désiré.

Pour l'exemple de la figure D.5, on applique pendant  $t_1$  la configuration (i), pendant  $t_2$  la configuration



**Figure D.5**

(i+1) et pendant le restant de la période ( $t_3 = T_{MLI} - t_1 - t_2$ ) on applique un vecteur nul.

Les temps  $t_1$  et  $t_2$  sont proportionnels aux segments, respectivement, OD et OE vis à vis de l'amplitude maximum d'un vecteur ( $V_v$ ) et à la période  $T_{MLI}$ .

Par exemple si le vecteur  $\vec{V}$  est colinéaire à la configuration (i) et a pour amplitude la moitié de  $V_v$ , alors  $t_1 = T_{MLI}/2$ ,  $t_2=0$  et  $t_3 = T_{MLI}/2$

**Q.D.27.** Exprimer le temps  $t_1$  en fonction des amplitudes  $V$  et  $V_v$ , du déphasage  $\varphi$  et de  $T_{MLI}$

**Q.D.28.** Exprimer le temps  $t_2$  en fonction des amplitudes  $V$  et  $V_v$ , du déphasage  $\varphi$  et de  $T_{MLI}$

**Q.D.29.** Soit  $t_3 = 0$ , on a  $T_{MLI} = (t_1 + t_2)$ , exprimer alors  $V$  en fonction de  $V_v$  et du déphasage  $\varphi$

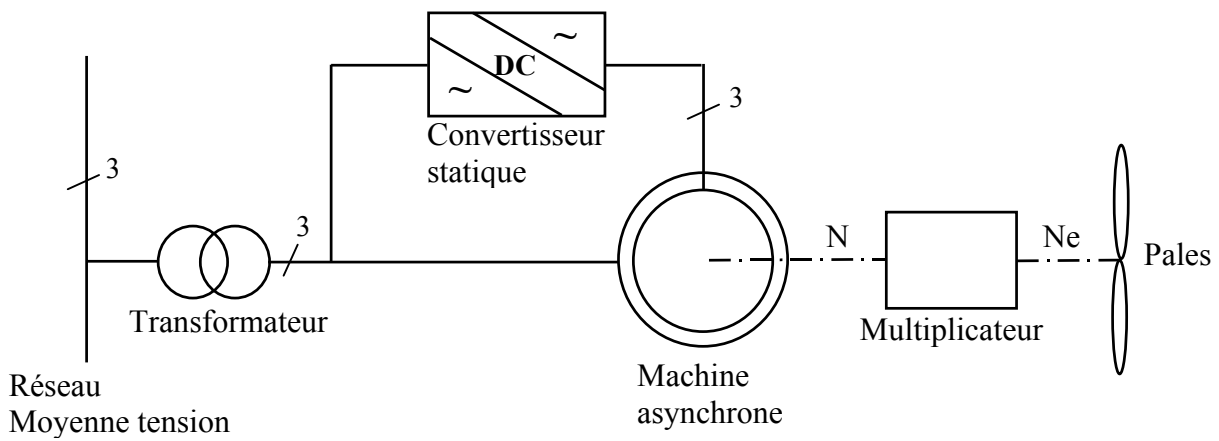
**Q.D.30.** Avec les conditions de la question précédente ( $t_3 = 0$ ), l'amplitude de  $V$  dépend du partage de  $T_{MLI}$  entre  $t_1$  et  $t_2$  : pour quelle valeur du déphasage  $\varphi$  a-t-on une amplitude minimum pour  $V$  ? Que vaut  $V$  dans ce cas ?

**Q.D.31.** Suite aux 2 questions précédentes, tracer sur le document réponse **REP.D.1** le lieu, sur  $2\pi$ , de l'extrémité de  $\vec{V}$  pour  $t_3 = 0$

Par exemple, le vecteur  $\vec{V}$  se situe entre deux vecteurs des configurations (2) et (3) avec une amplitude  $V$  inférieure à  $V_v$  (c'est à dire  $t_3 \neq 0$ ). Le chronogramme de la succession des configurations est élaboré de façon à avoir zéro ou une commutation entre deux successions (pour minimiser le nombre de commutation).

**Q.D.32.** En prenant  $t_1 = t_2 = t_3 = T_{MLI}/3$ , tracer sur le document réponse **REP.D.2** le chronogramme des répartitions des différentes configurations utilisées pendant 2 périodes de MLI en minimisant le nombre de commutation des interrupteurs. Ne pas oublier de compléter aussi le temps entre deux commutations ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ )

## Partie E : La commande du convertisseur statique



**Figure E.1**

Le convertisseur statique est constitué de 2 onduleurs à MLI : Onduleur 1 coté réseau et onduleur 2 coté rotor. Dans cette partie on s'intéresse à la commande des deux onduleurs.

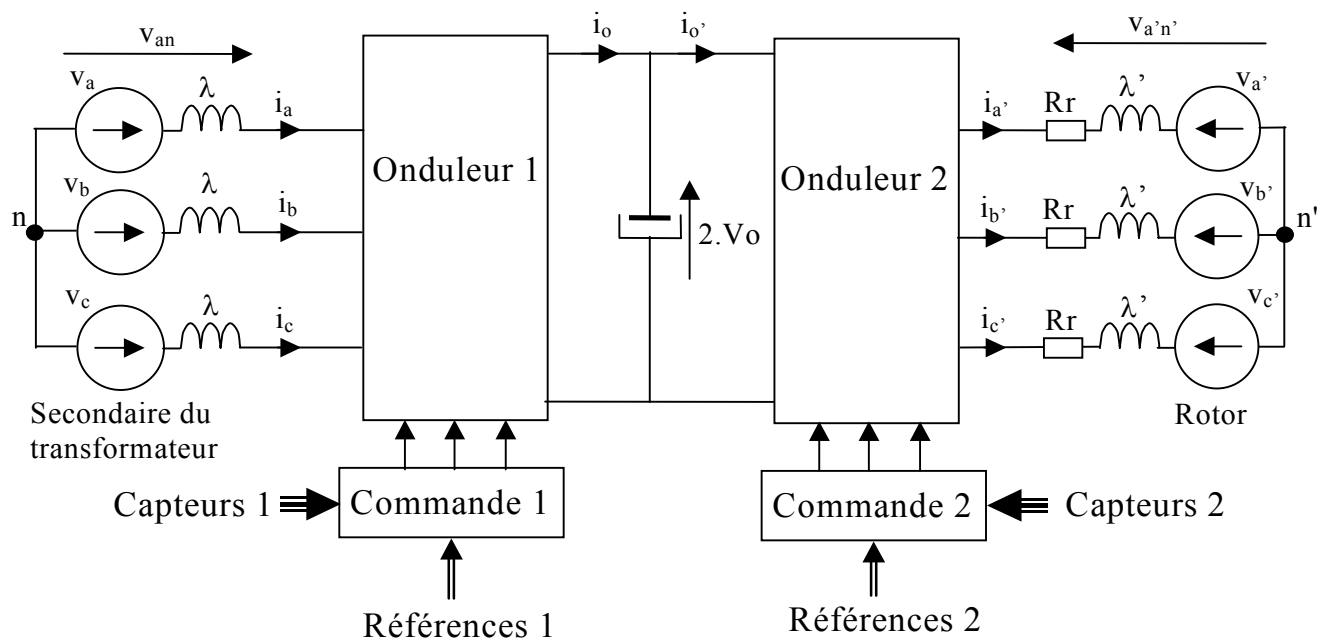


Figure E.2

### l'onduleur 1

La stratégie de commande de l'onduleur 1 est multiple. Sa première fonction est d'assurer le transfert de l'énergie entre le rotor de la machine asynchrone et le réseau. Ce transfert est bidirectionnel (du réseau vers le rotor ou l'inverse) avec des courants de forme sinusoïdale et avec aucun échange de puissance réactive avec le réseau pour minimiser l'amplitude des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ). Sa deuxième fonction est de réguler la tension du bus continu à  $2V_o$  égale à 980V.

La commande de cet onduleur est donc organisée en deux boucles de régulation cascade. La première boucle (boucle la plus interne) assure la forme sinusoïdale des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ) avec aucun échange de puissance réactive avec le réseau. La deuxième boucle assure la régulation de la tension du bus continu à  $2V_o$ .

- Q.E.1.** Proposer un schéma de régulation de la deuxième boucle d'asservissement (régulation de la tension du bus continu) en spécifiant bien la nature et le lieu du capteur à utiliser. Préciser comment est générée la référence (la définition et le calcul du correcteur ne sont pas à définir)
- Q.E.2.** Quelle est la grandeur physique représentée par la sortie du régulateur ?
- Q.E.3.** Le capteur utilisé nécessite-t-il une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie ? justifier votre réponse
- Q.E.4.** Proposer un schéma de régulation de la première boucle d'asservissement (forme sinusoïdale des courants) en spécifiant bien la nature et le lieu des capteurs à utiliser, sans ce préoccuper, pour cette question, de la génération des références (la définition et le calcul des correcteurs ne sont pas à définir)
- Q.E.5.** Quelle est la grandeur physique représentée par la sortie des régulateurs ?
- Q.E.6.** Les capteurs utilisés nécessitent-ils une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie ? justifier votre réponse
- Q.E.7.** Décrire le principe de fonctionnement d'un des capteurs le plus couramment utilisé pour ce genre d'application
- Q.E.8.** Proposer un schéma pour relier les deux boucles de régulation, en se préoccupant, pour cette question, de la génération des références de la boucle la plus interne

## **l'onduleur 2**

La stratégie de commande de l'onduleur 2 est différente. Sa fonction est de délivrer un système de tensions triphasées avec une amplitude et une fréquence qui dépendent du fonctionnement de l'éolienne, avec des courants ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) de forme sinusoïdale et un  $\cos \varphi'$  qui est variable ( $>0$  ou  $<0$ ). L'onduleur 2 fournit la totalité du courant magnétisant de la machine asynchrone (magnétisation de la machine asynchrone par les bobinages du rotor) et fait transiter de la puissance active entre le réseau et les bobinages du rotor.

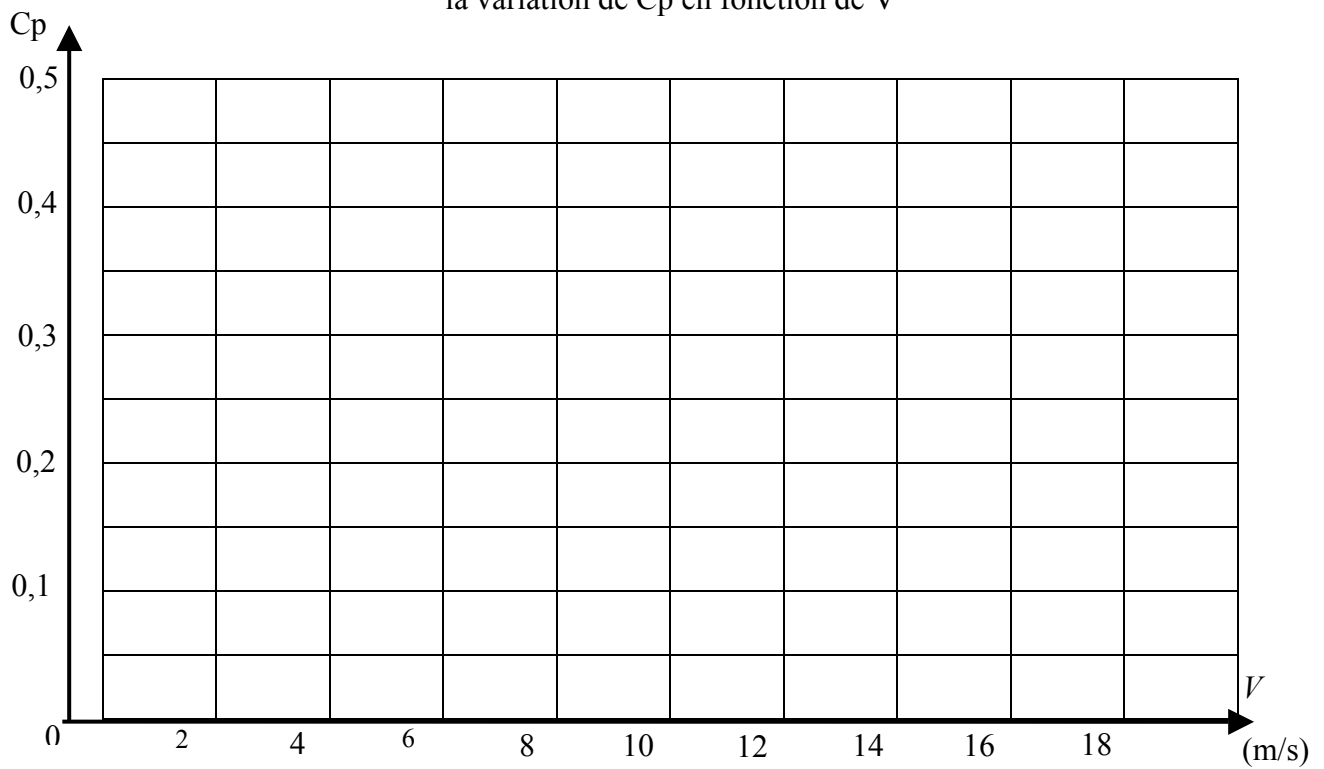
- Q.E.9.** Pour une vitesse de rotation donnée, quelle grandeur électrique agit directement sur l'amplitude du courant magnétisant au rotor de la machine.
- Q.E.10.** Que se passe-t-il si cette grandeur a une amplitude trop petite ?
- Q.E.11.** Que se passe-t-il si cette grandeur a une amplitude trop grande ?
- Q.E.12.** On désire que la magnétisation de la machine asynchrone se fasse uniquement par le rotor. Proposer un schéma de régulation en spécifiant bien la référence et la nature et le lieu du capteur (la définition et le calcul du correcteur ne sont pas à définir). La grandeur électrique de la question **Q.E.9** représente la sortie de ce régulateur
- Q.E.13.** La sortie du régulateur de la question **Q.E.12** est-elle modifiée lors d'un changement de vitesse de l'éolienne ? Justifier votre réponse
- Q.E.14.** Quelle grandeur de réglage permet d'agir directement sur la vitesse de l'éolienne ?
- Q.E.15.** Proposer une solution pour calculer le vecteur  $\vec{V}'$ , qui est l'entrée de commande de l'onduleur 2, compte tenu des réponses précédentes

## **Fin du problème**

# Document réponse REP.A.1

## Question Q.A.4

la variation de  $C_p$  en fonction de  $V$

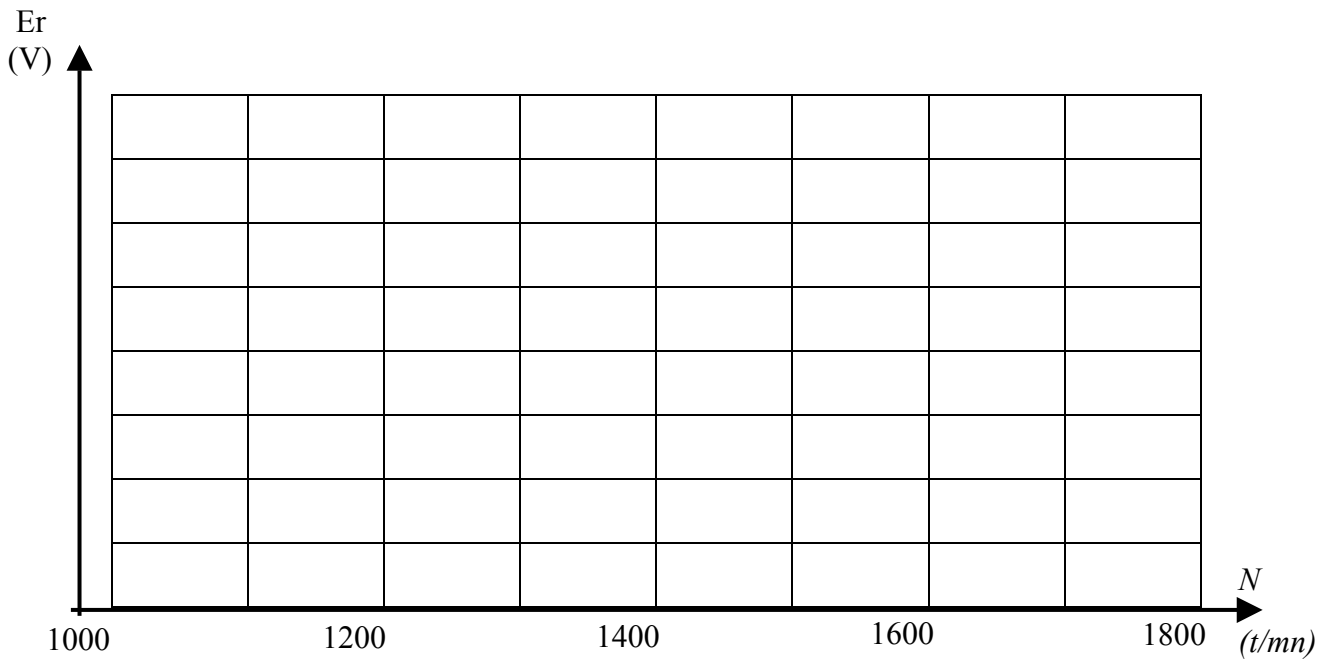


Vitesse du vent $V$ (m/s)	4	6	8	10	12	14	16	18
Puissance $P_r$ (kW)	47	257	636	1177	1570	1605	1605	1605
Puissance $P_p$ (kW)								
$C_p$								

## Document réponse REP.B.1

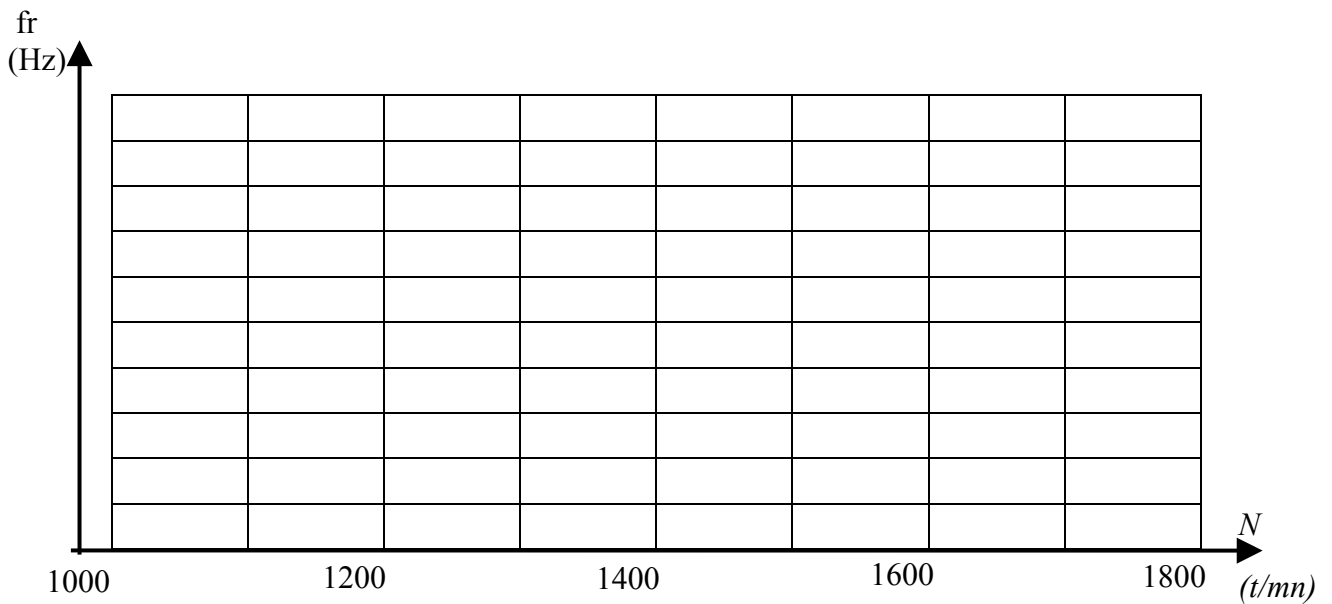
### Question O.B.11

la tension efficace  $E_r$  en fonction de la vitesse



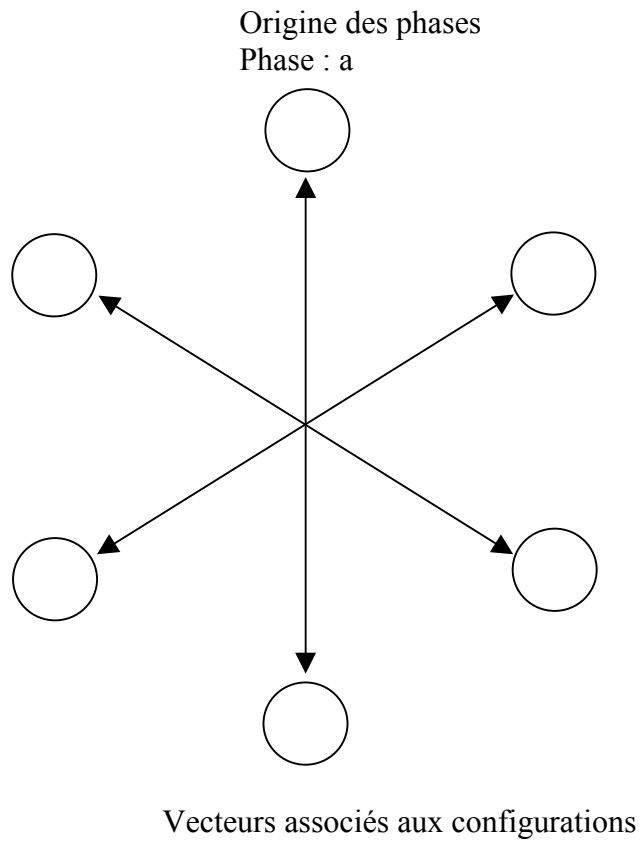
### Question O.B.13

fréquence rotorique  $f_r$  en fonction de la vitesse

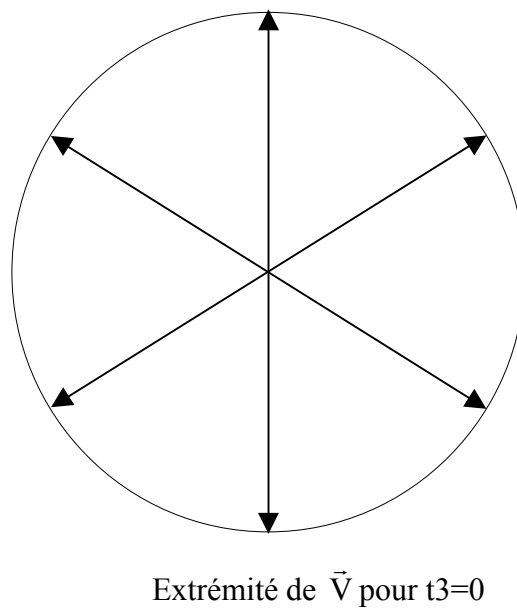


# Document réponse REP.D.1

## Question Q.D.26



## Question Q.D.31



## Document réponse REP.D.2

### Question Q.D.32

Chronogramme des différentes configurations en minimisant le nombre de commutation  
pour  $t_1 = t_2 = t_3 = T_{MLI}/3$

