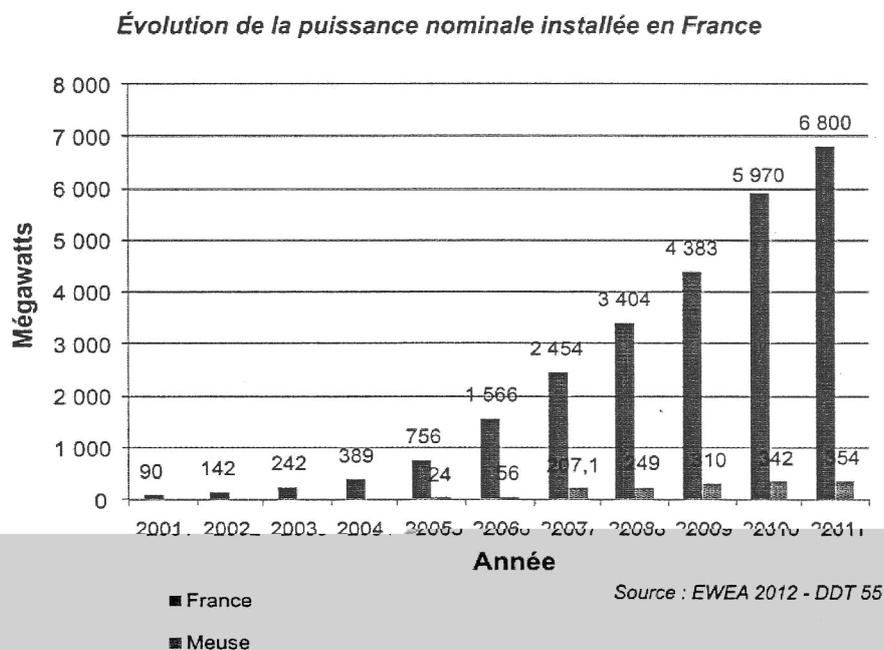


BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR

IMPLANTATION ET EXPLOITATION D'UN PARC ÉOLIEN

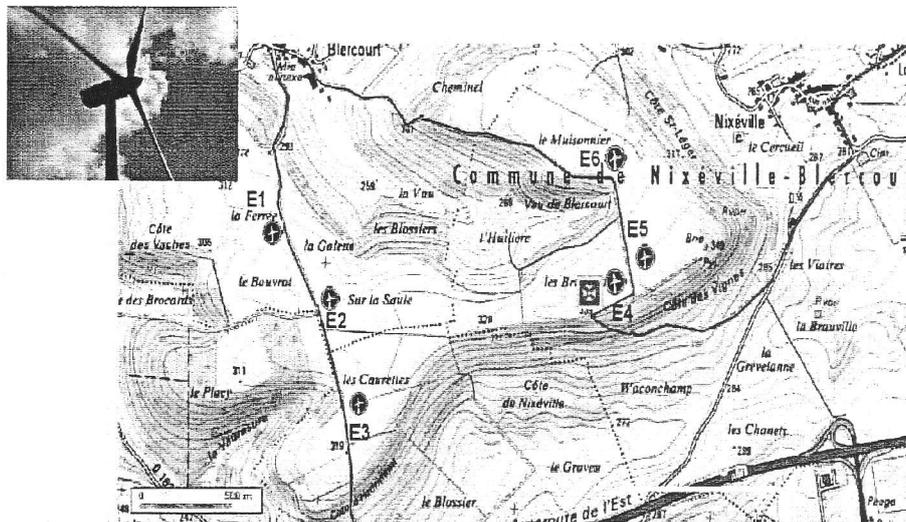
L'amélioration de l'efficacité énergétique et l'exploitation croissante des sources d'énergie renouvelables constituent les deux axes principaux de la transition énergétique que la France met en œuvre pour faire face à la demande en énergie. Un des objectifs du Grenelle de l'environnement est de porter à 23 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale d'ici à 2020.

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne, encouragée par la politique énergétique des différents gouvernements, ne cesse de croître depuis ces dix dernières années comme en témoignent le graphique suivant :



Le département de la Meuse présente selon le Schéma Régional Eolien (SRE) de Lorraine des conditions favorables à l'implantation d'éoliennes. La commune de « Rampont » fait partie de la zone dite de « zones de développement éolien » (ZDE) de la région, condition nécessaire pour bénéficier des tarifs de l'obligation d'achat garantis pendant 15 ans par le gestionnaire du réseau électrique. Le prix de rachat est actuellement fixé à 8,2 c/kW.h, il est indexé sur l'inflation.

La société « Iberdrola Renewable » a obtenu le permis de construire autorisant l'implantation d'un parc de six éoliennes sur le site dit de « Rampont » :



Les éoliennes proposées par le bureau d'étude chargé du projet sont de type « G90 – 2.0 MW » dans la gamme du fabricant européen Gamesa :

	G80-2.0 MW	G87-2.0 MW	G90-2.0 MW	G97-2.0 MW	G114-2.0 MW
ROTOR					
Diamètre	80 m	87 m	90 m	97 m	114 m
Aire balayée	5 027 m ²	5 945 m ²	6 362 m ²	7 390 m ²	10 207 m ²
Vitesse de rotation	9,0 – 19,0 tr.min ⁻¹	9,0 – 19,0 tr.min ⁻¹	9,0 – 19,0 tr.min ⁻¹	9,6 – 17,8 tr.min ⁻¹	–
PALES					
Nombre de pales	3	3	3	3	3
Longueur	39 m	42,5 m	44 m	47,5 m	55,5 m
Profil	NACA 63.XXX	DU + FFA-W3	DU + FFA-W3	Gamesa	Gamesa
Matériau	Fibre de verre préimprégnée de résine époxy	Fibre de verre			
TOURS					
Type de tour	Modulaire	Modulaire	Modulaire	Modulaire	Modulaire
Hauteur	60, 67, 78 et 100 m	67, 78, 90 et 100 m	67, 78 et 100 m	78, 90, 100 et 120 m	93, 120, 140 m et autres
MULTIPLICATEURS					
Type	1 étage planétaire 2 étages à arbres parallèles				
Rapport	1:100,5 (50 Hz) 1:120,5 (60 Hz)				
GÉNÉRATEUR					
Type	Générateur à double alimentation				
Puissance nominale	2.0 MW				
Tension	690 V AC				
Fréquence	50 Hz / 60 Hz				
Classe de protection	IP 54				
Facteur de puissance	0,95 CAP - 0,95 IND dans toute la plage de puissance*	0,95 CAP - 0,95 IND dans toute la plage de puissance*	0,95 CAP - 0,95 IND dans toute la plage de puissance*	0,95 CAP - 0,95 IND dans toute la plage de puissance*	0,95 CAP - 0,95 IND dans toute la plage de puissance*

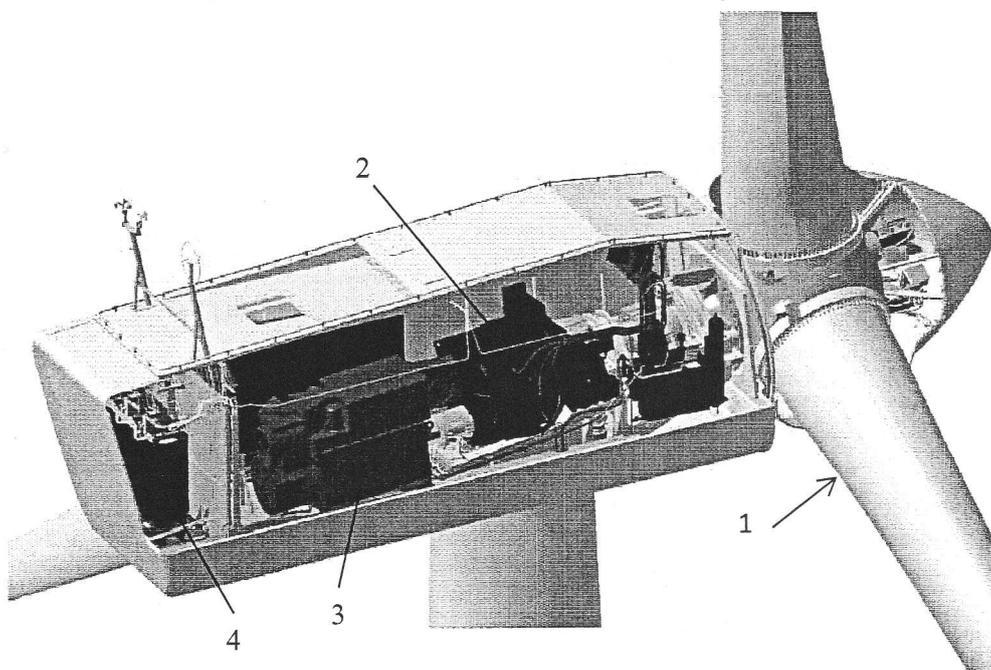
* Facteur de puissance sur les bornes de sortie de la génératrice, côté basse tension avant l'entrée du transformateur.

Tableau 1 – Données techniques extraites de la documentation du fabricant

Le fonctionnement d'une éolienne peut être décomposé selon les étapes suivantes :

Étape*	Remarques
Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation par l'intermédiaire des pales (1) de la turbine.	La plupart des éoliennes possèdent un mécanisme d'orientation des pales (« pitch control ») permettant de modifier la force de portance créée par le vent et donc le couple transmis sur l'arbre. Ce dispositif est utilisé soit pour optimiser le rendement, soit pour limiter la puissance convertie lorsque le vent devient trop fort.
Adaptation de la vitesse de l'arbre dit lent de la turbine à l'arbre rapide de la génératrice (2).	Les éoliennes de grand diamètre tournent à des vitesses faibles qui nécessitent un multiplicateur mécanique lorsque la génératrice associée est de type asynchrone. Une attaque directe sans multiplicateur est possible avec les génératrices de type synchrone.
Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique par la génératrice (3).	Les génératrices utilisées sont soit de type synchrone soit de type asynchrone. Des convertisseurs électriques de puissance peuvent être utilisés pour contrôler la vitesse de l'éolienne afin d'optimiser le transfert de puissance.
Adaptation de l'énergie électrique par le transformateur de raccordement au réseau (4).	Les valeurs efficaces nominales des tensions des génératrices sont généralement de 690 V. Un transformateur est donc nécessaire pour les raccorder au réseau de distribution HTA (20 kV).

*Les nombres entre parenthèses correspondent aux annotations du schéma ci-dessous :



Pour le site de Rampont, le bureau d'étude a préconisé l'implantation d'éoliennes fonctionnant à vitesse variable. Cette préconisation doit être validée par une étude comparative permettant d'estimer l'énergie annuelle produite. Le choix d'une génératrice asynchrone à double alimentation (MADA*) a d'autre part un impact direct sur le mode de raccordement des éoliennes au réseau et les perturbations potentiellement induites : l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion électrique sont nécessaires au dimensionnement du transformateur et de l'appareillage de contrôle et de protection.

*MADA = Machine Asynchrone à Double Alimentation

La structure de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) mise en œuvre dans l'éolienne G90 correspond au synoptique suivant :

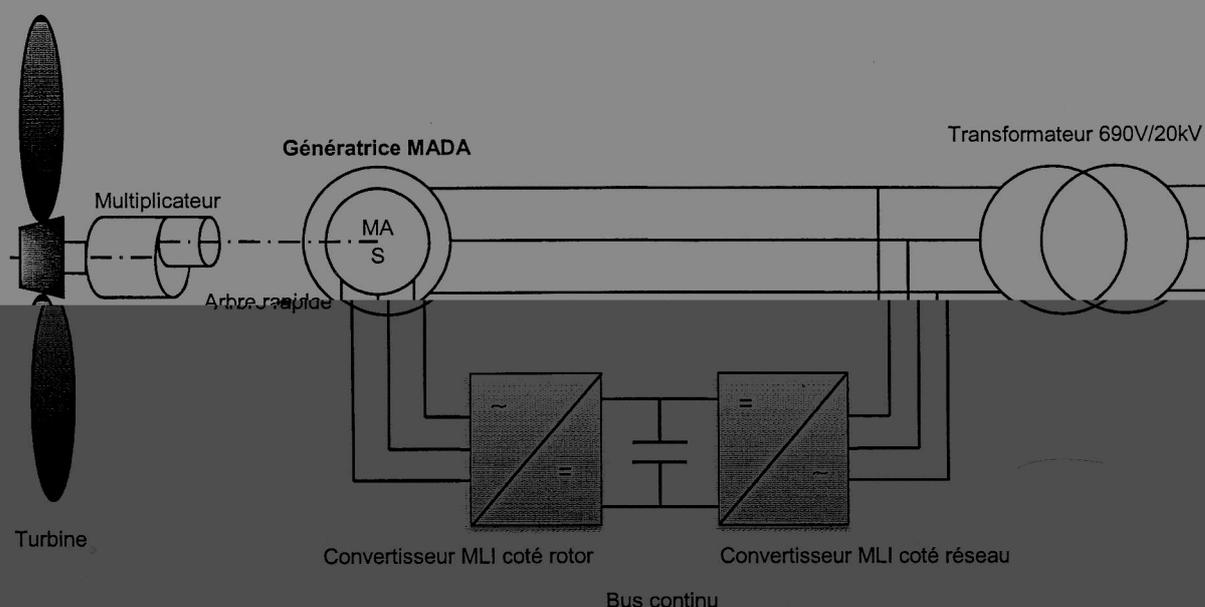


Schéma synoptique n°1 – Structure d'une génératrice de type MADA

Le contrôle de la puissance qui transite dans le rotor via les convertisseurs permet le contrôle du point de fonctionnement de l'éolienne afin d'optimiser la récupération de la puissance du vent. L'algorithme de recherche du point de fonctionnement optimal est communément appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking), il diffère selon la technologie des éoliennes et les méthodes des fabricants. Les performances des éoliennes G90 sont synthétisées par leur courbe de puissance :

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2014
Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation		Repère : 14-EQPEM Page 5/18

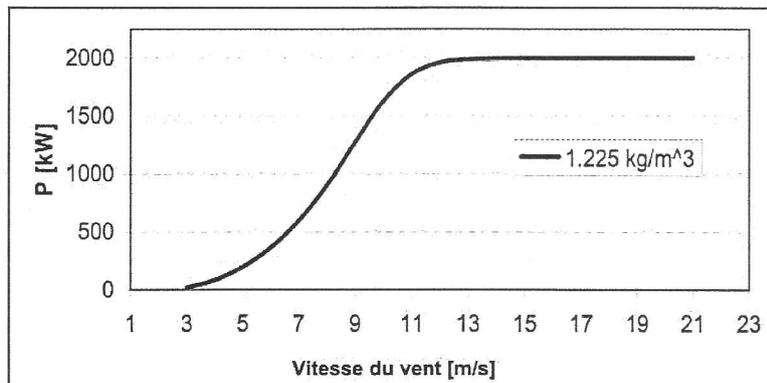


Figure 1. Courbe de puissance de l'écogénérateur à EC 2.0 MW pour une densité de l'air égale à 1,225 [kg/m³].

Enjeux

Le parc éolien du site de Rampont est en exploitation depuis maintenant trois ans. Pendant sa phase de conception, l'enjeu principal du bureau d'étude chargé du projet était de proposer un schéma d'implantation permettant d'assurer le retour sur investissement le plus rapide tout en respectant les contraintes environnementales et les possibilités de raccordement au réseau haute tension de distribution de l'énergie électrique :

- la production annuelle d'énergie électrique doit être maximisée par rapport au potentiel éolien du site ;
- la continuité de service et l'impact sur le réseau de raccordement doivent être optimisés.

Problématiques

Le bureau d'étude a donc dû définir et choisir :

- la puissance nominale et le diamètre des éoliennes ;
- le mode de fonctionnement en vitesse fixe ou variable des éoliennes ;
- la technologie de la génératrice utilisée et des convertisseurs potentiellement associés : génératrice synchrone, asynchrone à cage, asynchrone à double alimentation ;
- la topologie et la structure du circuit électrique jusqu'au point de raccordement ;
- l'infrastructure du réseau de supervision.

Les sujets des épreuves E.4.1 et E.4.2 ont pour objet de valider ou justifier les choix et les options techniques retenus par le bureau d'étude.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2014
Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 14-EQPEM	Page 6/18

INTRODUCTION

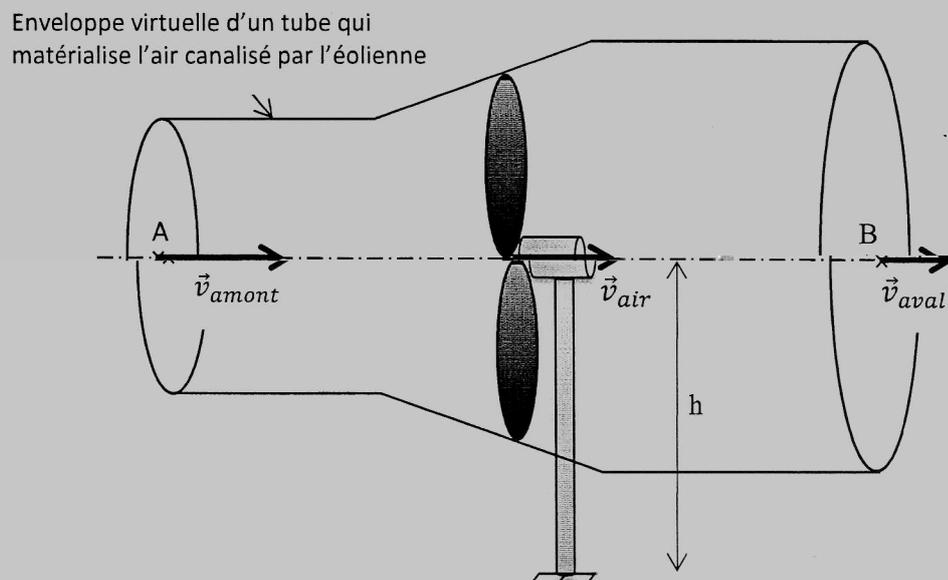
Ce sujet est décomposé en 4 parties A, B, C et D indépendantes. Il est toutefois recommandé de les traiter dans l'ordre pour avoir une meilleure compréhension et une vision plus cohérente du sujet :

- l'approche d'un point de vue physique du fonctionnement d'une des éoliennes est traité dans la partie A, ce qui permet de quantifier l'énergie récupérable ;
- la partie B permet de justifier le fonctionnement à vitesse variable des génératrices afin d'optimiser leur rendement ;
- l'intérêt de la structure MADA est étudié dans la partie C ;
- les données de production sont exploitées dans la partie D.

Pour les applications numériques, le nombre de chiffres significatifs et l'unité choisis doivent être adaptés au contexte et à la grandeur. Les valeurs numériques fournies dans les énoncés ne sont pas répétées dans chaque partie, les documents techniques ainsi que les schémas de la partie présentation (pages 2 à 6) font partie intégrante du sujet en tant que données exploitables.

PARTIE A : PUISSANCE MAXIMALE RÉCUPÉRABLE

L'éolienne « canalisée » le vent qui lui fait face et convertit son énergie cinétique en énergie mécanique de rotation. Toute l'énergie du vent n'est cependant pas récupérable puisque sa vitesse en aval de l'éolienne n'est pas nulle :



BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2014
Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 14-EQPEM	Page 7/18

Les faibles vitesses de déplacement d'air mises en jeu sont, telles que la masse volumique peut être considérée comme constante. Dans ces conditions, le théorème de Bernoulli reste applicable sous sa forme classique :

$$E_B = E_A - E_{\text{éolienne}} - \sum \text{pertes}$$

avec :

- E_A, E_B : énergie volumique de l'air respectivement en amont et en aval de l'éolienne ;
- $E_{\text{éolienne}}$: énergie volumique convertie par l'éolienne.

L'énergie volumique peut être calculée connaissant la pression p , la masse volumique ρ , l'altitude z et la vitesse v de la masse d'air au point considéré :

$$E = p + \rho \times g \times z + \frac{1}{2} \times \rho \times v^2$$

Conventions et applications numériques :

- tous les calculs seront effectués avec $\rho_{\text{air}} = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- la base du mât de l'éolienne, de hauteur d'axe h , sera prise comme origine des altitudes ;
- toutes les pertes associées au frottement de l'air seront négligées ;
- si nécessaire, la pression atmosphérique (p_{atm}) sera prise égale à $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$.

- A.1. Donner l'expression de l'énergie volumique de l'air au point A (E_{amont}) en fonction des paramètres suivants : p_{atm} , v_{amont} , h et ρ_{air} .
- A.2. Faire de même pour l'énergie volumique de l'air au point B (E_{aval}) en fonction de p_{atm} , v_{aval} , h et ρ_{air} .
- A.3. En déduire l'expression de l'énergie volumique interceptée par l'éolienne ($E_{\text{éolienne}}$) en appliquant le théorème de Bernoulli entre les points A et B.
- A.4. Justifier par une équation aux dimensions que la puissance du vent récupérée par l'éolienne ($P_{\text{éolienne}}$), l'énergie volumique correspondante ($E_{\text{éolienne}}$) et le débit volumique de l'air au niveau de l'éolienne (Q_V), sont liés par la relation $P_{\text{éolienne}} = E_{\text{éolienne}} \cdot Q_V$

On admet que la vitesse de l'air (v_{air}) au niveau de l'éolienne est égale à la **valeur moyenne** des vitesses aux points d'entrée (A) et de sortie (B) :

- A.7. En vous référant au tableau 1 page 3, calculer la puissance maximale récupérable par l'éolienne G90 de la gamme Gamesa pour une vitesse moyenne de vent en amont de 7 m.s^{-1} . Renseigner le résultat dans le tableau 1 du document réponse n°1 page 17.
- A.8. Compléter ce tableau en calculant l'énergie annuelle maximale correspondante, en faisant l'hypothèse que l'on a cette vitesse moyenne de vent toute l'année.

PARTIE B : VITESSE FIXE OU VITESSE VARIABLE

Le choix des éoliennes (puissance nominale, diamètre, technologie, prix, etc.) est l'élément clé de la conception du parc. La plupart des fabricants proposent différentes technologies adaptées à la topologie du terrain et à la variabilité du vent. L'objectif de cette partie est de comparer l'efficacité des éoliennes fonctionnant à « vitesse fixe » par rapport à celles fonctionnant à « vitesse variable ». On définit ainsi le coefficient de performance C_p d'une éolienne par le rapport :

$$C_p = \frac{\text{Puissance électrique générée}}{\text{Puissance du vent}}$$

Le C_p d'une éolienne a une valeur théorique maximale ($C_{pMax} = \frac{9}{16}$), appelée limite de Betz, indépendante des rendements de transmission mécanique et de conversion électrique : l'énergie cinétique du vent ne peut en effet être intégralement convertie en énergie électrique puisque la vitesse du vent en aval de l'éolienne n'est jamais nulle. On montre que cette énergie résiduelle dépend directement de la vitesse de rotation des pales : le C_p d'une éolienne dépend donc de la vitesse de rotation de son rotor.

À partir de l'équation obtenue expérimentalement, on peut tracer un réseau de courbes $C_p=f(\Omega)$ pour plusieurs vitesses de vent. La figure 1 du document réponse n°1 page 17 représente quelque unes de ces courbes pour une éolienne ayant des caractéristiques équivalentes à celles du site de Rampont.

- B.1. Positionner sur la courbe paramétrée à $v_{vent} = 7 \text{ m.s}^{-1}$ le point de fonctionnement optimal de l'éolienne. Quelle est la valeur de C_p correspondante ?
- B.2. Préciser la valeur de la vitesse de rotation des pales en tr.min^{-1} .

On rappelle que les éoliennes du site de Rampont sont du type « G90 -2.0 MW » (cf. tableau 1, page 3) :

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2014
Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 14-EQPEM	Page 10/18

- B.3. Calculer la valeur de la puissance électrique générée P_{Gv7} sachant que la puissance du vent peut être calculée par la formule :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \times \rho_{\text{air}} \times S \times v_{\text{vent}}^3$$

où S correspond à la surface balayée par les pales de l'éolienne.

- B.4. Pour la même vitesse de rotation du rotor de l'éolienne, positionner le nouveau point de fonctionnement correspondant à une vitesse de vent de 9 m.s^{-1} et calculer la nouvelle valeur de la puissance électrique générée P_{Gv9} .
- B.5. Ce point de fonctionnement est-il optimal ? Justifier.
- B.6. En supposant cette fois la vitesse de rotation des pales réglable, déterminer quelle serait pour un vent de 9 m.s^{-1} sa valeur optimale en tr.min^{-1} . Calculer la nouvelle valeur de la puissance électrique générée P'_{Gv9} .
- B.7. Comparer P'_{Gv9} avec P_{Gv9} puis conclure.

B.8.

PARTIE C : GÉNÉRATRICE de type « MADA »

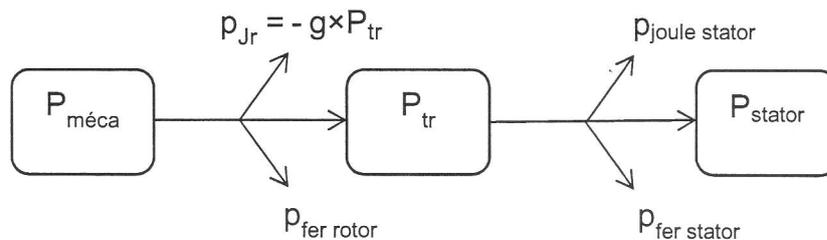
La conversion de l'énergie mécanique transmise par les pales de l'éolienne en énergie électrique est réalisée par la génératrice, associée ou non à un ou plusieurs convertisseurs électriques. Actuellement, les génératrices de type MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) sont les plus utilisées dans les éoliennes fonctionnant à vitesse variable, c'est aussi le cas des éoliennes du site de Rampont.

La génératrice est en fait une machine asynchrone à rotor bobiné. Les enroulements du rotor ne sont pas fermés sur des résistances mais connectés au même réseau que celui « alimentant » le stator par l'intermédiaire de deux ponts réversibles pouvant fonctionner soit en onduleur MLI soit en redresseur MLI. Ces deux ponts permettent donc un échange de puissance électrique entre le rotor et le réseau.

Nous allons dans cette partie analyser le transfert de puissance à travers la MADA afin de dimensionner les convertisseurs MLI.

C.1 Bilan de puissance

Le bilan de puissance classique d'une machine asynchrone à cage en convention génératrice est rappelé sur la figure ci-dessous :



Pour la suite, on négligera toutes les pertes autres que les pertes joules rotoriques (p_{Jr}) :

- C.1.1. Déterminer la relation entre P_{stator} , $P_{méca}$ et g .
- C.1.2. Déterminer la relation entre p_{Jr} , P_{stator} et g .
- C.1.3. En déduire la relation entre p_{Jr} , $P_{méca}$ et g .

Ces trois relations seront exploitées pour compléter les schémas de puissance dans la partie suivante.

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2014
Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 14-EQPEM	Page 12/18

C.2 Puissance rotorique

Dans une structure de type MADA, la puissance électrique au niveau du ré-

C.2.4. Calculer les puissances P_{rotor} , P_{stator} et compléter le diagramme n°1 du document réponse n°2 p18. En déduire $P_{\text{réseau}}$.

Une éolienne est caractérisée par sa courbe $C_p=f(\lambda)$, λ étant le coefficient d'avance (« Tip Speed Ratio ») défini par le rapport :

$$\lambda = \frac{R \times \Omega}{v_{\text{vent}}}$$

avec :

- R , le rayon du disque balayé par les pales de l'éolienne en m ;
- Ω , la vitesse angulaire de rotation des pales en rad.s^{-1} ;
- v_{vent} , la vitesse du vent en amont de l'éolienne en m.s^{-1} .

C.2.5. Calculer la valeur du coefficient d'avance λ pour le point de fonctionnement précédent.

C.2.6. Le coefficient λ étant maintenu constant pour tous les points de fonctionnement de l'éolienne, montrer que la vitesse du vent qui correspond à $g=g-$ (fonctionnement hypo synchrone), a pour valeur $v_{\text{vent}} = 5,7 \text{ m.s}^{-1}$

C.2.7. En déduire la nouvelle valeur de la puissance mécanique fournie par les pales sachant que cette dernière est en première approximation proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

C.2.8. Calculer les puissances P_{rotor} , P_{stator} et compléter le diagramme n°2 du document réponse n°2 p18. En déduire $P_{\text{réseau}}$.

C.2.9. Quelle doit être la valeur de la puissance nominale des deux convertisseurs MLI de la structure MADA en supposant que l'éolienne est dimensionnée pour une vitesse de vent de 12 m.s^{-1} ?

BTS ÉLECTROTECHNIQUE		SESSION 2014
Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel Pré-étude et modélisation	Repère : 14-EQPEM	Page 14/18

PARTIE D : COMMANDE ET RÉGULATION

Les objectifs du contrôle de l'éolienne et en particulier de la génératrice MADA sont d'une part de rechercher le point de fonctionnement optimal en fonction de la vitesse du vent (MPPT) et d'autre part de maîtriser le facteur de puissance au point de raccordement sur le réseau. On minimisera ainsi les perturbations harmoniques et on contrôlera la puissance réactive échangée.

Convertisseur côté réseau (onduleur MLI)

La commande de l'onduleur MLI permet d'une part de maintenir la tension du bus continu constante et d'autre part de réguler le facteur puissance au point de raccordement.

Le tableau ci-dessous est issu du logiciel de supervision du parc. Les données sont relatives à l'éolienne « E1 » :

1	nAerogenerador	dtFecha	dPotTotal	dPotReact	dVelVientoF1sg	dCosPhi	dTempGen	dPosNacelle
2	1	19:00:00	105,055556	-3,44444444	3,91111111	-0,10888889	26,6555556	243,444444
3	1	19:10:00	305,244444	9,22222222	5,34444444	0,777	26,5444444	241,333333
4	1	19:20:00	415,2125	13,75	6,3	0,499125	26,55	241
5	1	19:30:00	461,288889	26,6666667	6,71111111	0,99833333	27,0555556	232
6	1	19:40:00	554,3	32,6666667	6,64444444	0,99822222	27,3555556	232
7	1	19:50:00	629,877778	37	7,26666667	0,99811111	27,5111111	232
8	1	20:00:00	703,2	52,8888889	7,53333333	0,99733333	27,4888889	232
9	1	20:10:00	928,344444	75,4444444	8,17777778	0,99666667	27,6222222	232

Aide à la lecture du tableau :

- dtFecha : heure de relevé
- dPotTotal : puissance active totale en kW
- dPotReact : puissance réactive totale en kVAR
- dVelViento : vitesse du vent en $m.s^{-1}$

D.1. Analyser le tableau et relever les valeurs de la vitesse du vent, de la puissance active totale et de la puissance réactive à 20h00.

D.5. Que peut-on dire de la régulation du facteur de puissance sur la durée totale du relevé ? Les valeurs mesurées sont-elles compatibles avec les données techniques du constructeur ?

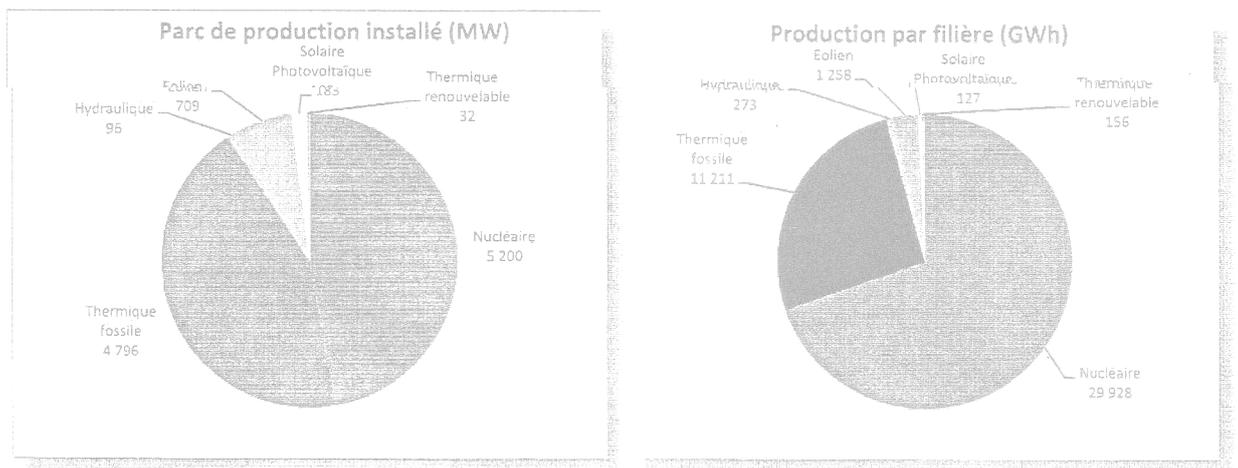
Les données de production sur 10 jours consécutifs de l'éolienne E1 sont synthétisées dans le tableau suivant :

Produccion (kWh)	LineaOk	TurbinaOk	HoraAmbOk	HorasMarcha	Disponibilidad	HorasFas	Factor de potencia	Coeficiente de potencia	FechaInicio	FechaFin	HorasOperacion
2916	22	21	22	15,48	95,45	1,46	0,07	19/09/2012 00:00			2000
970	24	24	24	11,42	100	0,48	0,02	20/09/2012 00:00			2000
6158	24	24	24	21,33	100	2,08	0,14	21/09/2012 00:00			2000
1398	24	24	23	11,07	100	0,7	0,03	22/09/2012 00:00			2000
13420	24	24	24	24	100	6,71	0,29	23/09/2012 00:00			2000
34624	24	23	24	23,82	95,83	17,31	0,76	24/09/2012 00:00			2000
24030	24	24	24	23,98	100	12,02	0,53	25/09/2012 00:00			2000
15988	24	24	24	24	100	7,99	0,35	26/09/2012 00:00			2000
29446	24	24	24	23,98	100	14,72	0,65	27/09/2012 00:00			2000
3942	24	24	24	23,23	100	1,97	0,09	28/09/2012 00:00			2000

D.6. Calculer le facteur de charge de l'éolienne sur cette période :

$$\text{Facteur charge} = \frac{\text{Énergie effectivement produite}}{\text{Énergie qui serait produite à la puissance nominale de l'éolienne}}$$

D.7. Comparer la valeur obtenue avec le facteur de charge moyen de la filière éolienne en Lorraine en 2012 :



Puissance installée et production énergétique en Lorraine en 2012

Document réponse 1 :

Tableau 1 :

$$V_{\text{vent}} = 7 \text{ m.s}^{-1}$$

	G80	G87	G90	G97	G114
--	-----	-----	-----	-----	------

Document réponse 2 :

Diagramme n°1 :

Compléter les cases vides avec les valeurs numériques associées au point de