

ANNEXE 7

TRACTEBEL ENGINEERING

Avenue Ariane, 7 – 1200 Brussels - BELGIUM

tel. +32 2 773 99 11 - fax +32 2 773 99 00

engineering@gdfsuez.com

www.tractebel-engineering-gdfsuez.com

TECHNICAL NOTE



Our ref.: WINDDEV/4NT/0216007/000/00

TS:

Imputation: P.000882/0133

Client :

Project : **WIND ASSISTANCE EBL RGB**

Subject : Lierneux - Etude de productible pour 4 types de machines

Comments:

00	11/08/10	FIN	*S. Godinho Vieira	*D. Terrie *D. Alen	*O. Moreau
----	----------	-----	--------------------	------------------------	------------

REV.	YY/MM/DD	STAT.	WRITTEN	VERIFIED	APPROVED	VALIDATED
------	----------	-------	---------	----------	----------	-----------

* This document is fully electronically signed on 26/08/2011.

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION	5
2. CONCLUSION	5
2.1. Etude de production.....	5
2.2. Rendement des éoliennes.....	6
2.3. Implantation.....	6
3. PROPOSITION D'IMPLANTATION	7
4. CLIMAT DE VENT.....	8
5. PRODUCTION.....	10
5.1. Choix des éoliennes	10
5.2. Production brute.....	11
5.3. Production nette	13
5.4. Certification des turbines	14
6. ANALYSE D'INCERTITUDE	15
7. BIBLIOGRAPHIE.....	18

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats d'estimation de productible pour différents types de machines pour le site de Lierneux. Il s'agit d'évaluer quelle machine correspondra le mieux techniquement aux conditions locales. Cette étude devra être mise en parallèle avec une étude budgétaire pour définir la ou les meilleures machines à prendre en compte pour ce projet.

Les chapitres 4, 5 et 6 indiquent la démarche suivie par TRACTEBEL ENGINEERING (TE) pour déterminer la production nette d'énergie attendue par le parc.

L'implantation proposée a été déterminée en prenant en compte:

- les prescriptions du Cadre de référence (1) ;
- l'optimisation du productible ;
- la réduction des externalités négatives (bruit, ombre...).

L'ensemble des informations qui ne sont pas propres à ce projet mais concernent la méthodologie de TE sont présentées dans (2)

2. CONCLUSION

2.1. Etude de production

Les coordonnées des 8 éoliennes sont reprises dans le tableau en §3. La vitesse moyenne dans le parc est de 6.4 m/s. La production P50 et P90 nette du parc est reprise dans le tableau ci dessous.

Production nette (M Wh/an)		MM 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
Total pour le parc	P 50 nette	37 961	54 763	44 461	51552
	P 90 nette - 1an	32 569	46 851	38 065	44 813
	P 90 nette - 10 ans	34 172	49 214	39 989	46 595
	P 90 nette - 20 ans	34 281	49 376	40 121	46 713
Eolienne moyenne	P 50 nette	4 745	6 845	5 558	6 444
	P 90 nette - 1an	4 071	5 856	4 758	5 602
	P 90 nette - 10 ans	4 271	6 152	4 999	5 824
	P 90 nette - 20 ans	4 285	6 172	5 015	5 839

TABLEAU 1: PRODUCTION NETTE DU PARC

FLEOH net (h/an)	MM 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
FLEOH50	2 315	2 159	2 197	2 685
FLEOH90 - 1 an	1986	1847	1881	2 334
FLEOH90 - 10 ans	2 084	1941	1976	2 427
FLEOH90 - 20 ans	2 090	1947	1982	2 433

TABLEAU 2: FLEOH NETTE DU PARC

La machine produisant le plus est logiquement la 3.2M114 qui est celle qui possède la puissance nominale la plus grande. Par contre, on voit également que la machine de type N117 a une production nette presque aussi élevée que celle de la 3.2M114. Pourtant leur puissance nominale sont assez éloignées (respectivement 2.4 contre 3.17 MW). Ceci se traduit clairement en termes d'heures équivalentes à pleine puissance où la N117 se détache largement des autres machines.

La 3.2M114 est également la machine ayant un nombre d'heures équivalentes à pleine puissance le plus bas.

Plus de détails sont disponibles dans la section 5.

2.2. Rendement des éoliennes

Le tableau ci-dessous reprend les données de rendement du parc par éolienne et par type de machine.

Eolienne	Rendement (%)			
	M M 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
1	95.7	94.3	95.5	94.5
2	90.8	87.9	90.3	88.9
3	92.2	89.7	91.8	89.7
4	87.1	83.2	86.4	84.2
5	94.2	92.4	94.0	92.2
6	90.3	87.2	89.8	87.9
7	97.0	96.1	96.9	95.8
8	93.0	90.9	92.7	91.2
Moyenne	92.5	90.2	92.2	90.6
Minimum	87.1	83.2	86.4	84.2

TABLEAU 3: RENDEMENT PAR ÉOLIENNE DU PARC

Le rendement global du parc est assez faible et d'autant plus faible que le diamètre du rotor est grand. On note en particulier que l'éolienne numéro 4 est la plus impactée. Avec un tel niveau de rendement (83.2% pour les 3.2M114 !); il paraît opportun d'évaluer dans quelle mesure l'ajout de cette éolienne améliore ou diminue la rentabilité du projet. En effet, supprimer cette éolienne permettrait de relever le rendement global du parc mais réduirait inévitablement la production totale du parc.

Plus de détails sont disponibles dans la section 5.

2.3. Implantation

L'implantation présente des distances entre éoliennes relativement étroites. De plus, une forêt assez importante se situe dans la direction des vents dominants. Ces deux paramètres rendent le site particulièrement sensible aux turbulences. L'estimation de celles-ci à l'aide de toutes les informations à notre disposition donne un résultat inférieur aux normes mais une attention particulière devra être maintenue sur ce sujet.

Le fournisseur d'éoliennes devra de toute façon être consulté et il devra démontrer par une analyse des charges mécaniques (mechanic load analysis - MLA) la bonne conformité des éoliennes par rapport au site et à l'implantation. Ceci fait partie des étapes standards lors de l'achat d'éoliennes. Il y a de fortes chances pour que le fournisseur d'éoliennes accepte l'installation de turbines certifiées classe IIIA dans une zone où la vitesse moyenne de vent est inférieure à 7.5 m/s si les charges auxquelles sont soumis les différents équipements sont toujours inférieures aux limites de leur design. Une certification spéciale, spécifique au site, sera alors fournie.

Plus de détails sont disponibles dans les sections 3 et 5.

3. PROPOSITION D'IMPLANTATION

L'implantation suivante est étudiée :

Eolienne	Coordonnées (Lambert 72)		Altitude au dessus du niveau de la mer (m) Before
	x	y	z
1	250 799	108 059	518
2	251094	107 906	527
3	250 764	107 511	534
4	251069	107 493	544
5	250 690	107 122	537
6	251085	107 154	560
7	250 669	106 531	540
8	250 998	106 646	545

TABLEAU 4: COORDONNÉES LAMBERT 72

Cette implantation est l'implantation retenue par Electrabel. Elle tient compte des propositions de Tractebel et donc des restrictions diverses du cadre de référence ainsi que du résultat des négociations parcellaires.

Il est à noter que Tractebel considère cette implantation fort « serrée » et que le faible écartement entre éoliennes se fera ressentir en termes de rendement des machines et de turbulences induites (voir §5).

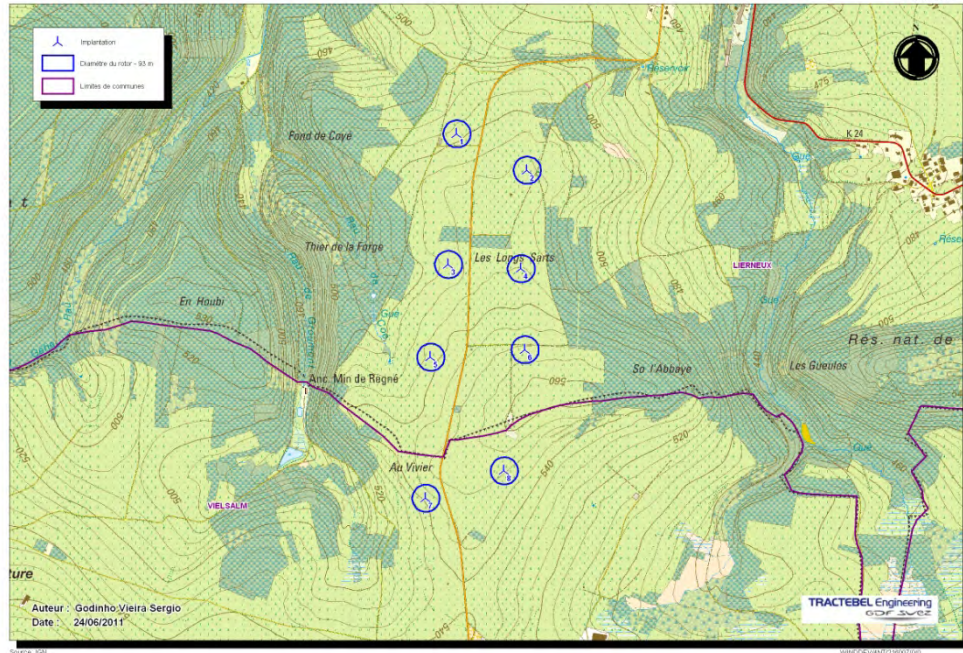


Figure 1: Implantation

4. CLIMAT DE VENT

Sur base de la méthodologie exposée dans (2), le climat de vent local du site est calculé à différentes hauteurs correspondant aux hauteurs de moyeu des éoliennes considérées (section 5.1). A une hauteur de 98.5 m, le climat de vent local est caractérisé les paramètres de Weibull présentés au Tableau 5. La distribution de Weibull, les répartitions de fréquence par secteur (rose des vents) et de l'énergie par secteur (rose d'énergie) sont présentées aux figures suivantes.

A	k	Vitesse moyenne
m/s	x	m/s
7.25	2.299	6.42

TABLEAU 5: CLIMAT DE VENT LOCAL À 98.5 M – PARAMÈTRES DE WEIBULL ET VITESSE MOYENNE

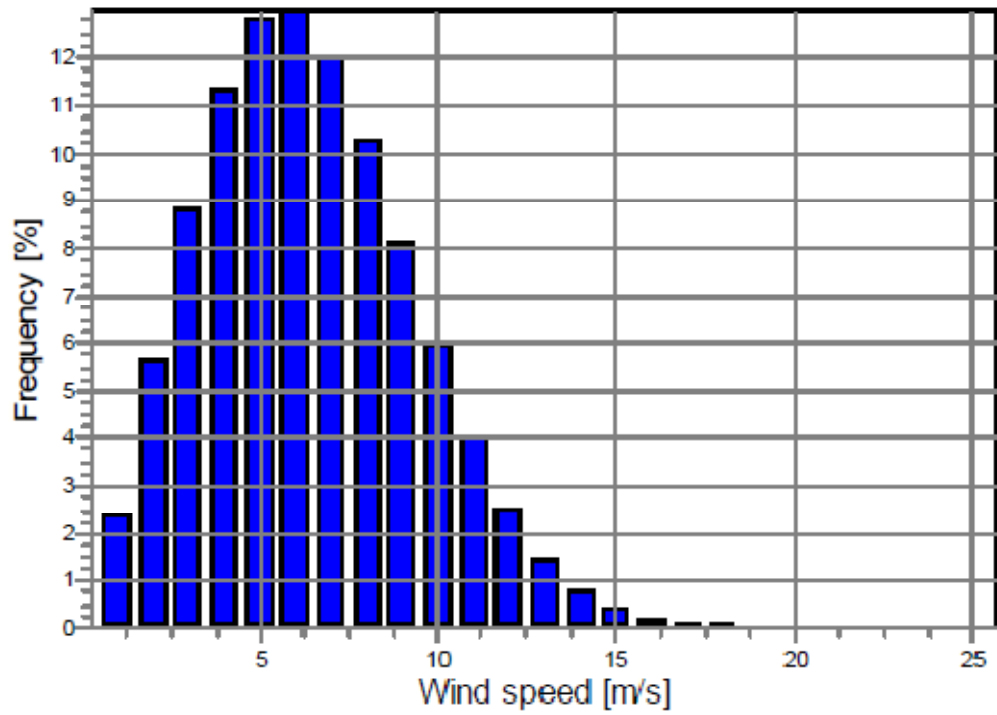


Figure 2: Climat de vent local - Distribution Weibull

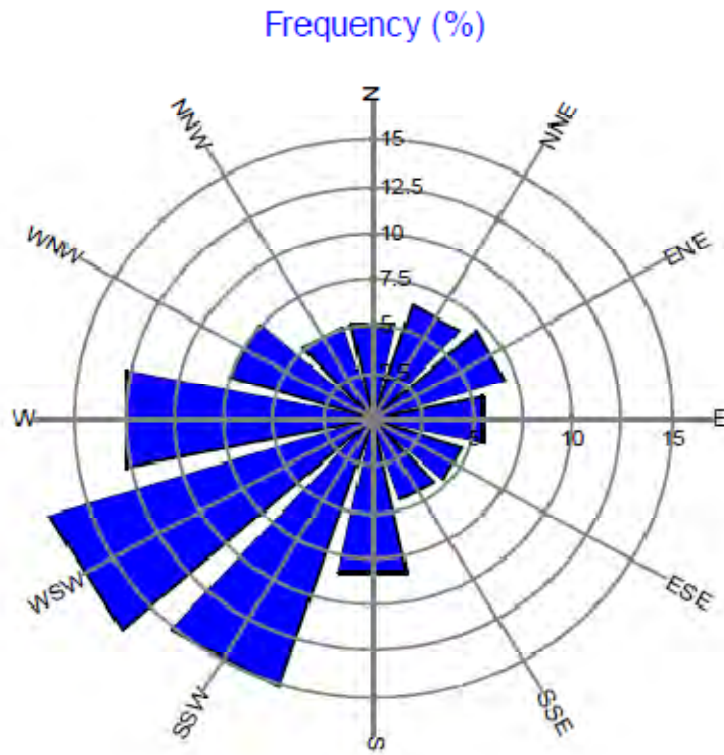


Figure 3: Climat de vent local - Rose des vents

Energy Rose (kWh/m²/year)

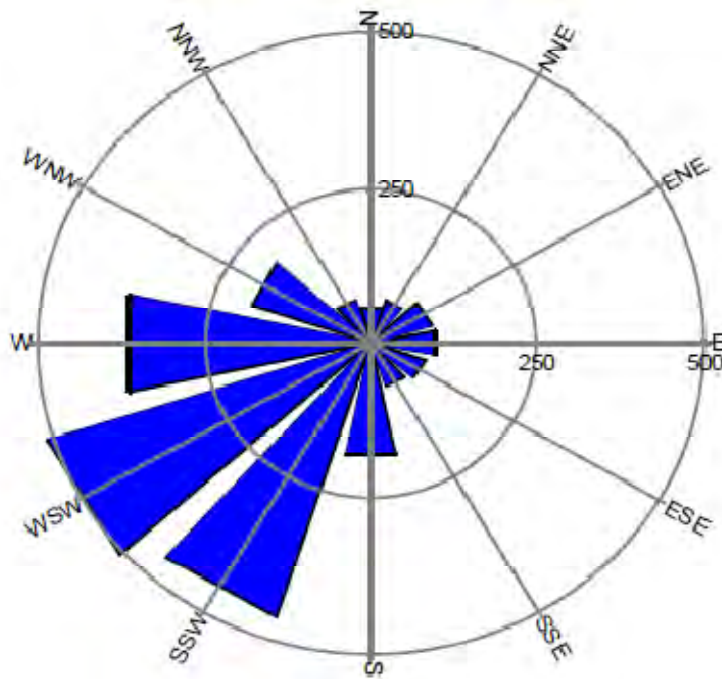


Figure 4: Climat de vent local – Rose d’énergie

5. PRODUCTION

5.1. Choix des éoliennes

Compte tenu de l’état d’avancement du projet et des recommandations du client, la présente étude est réalisée pour les éoliennes suivantes :

Constructeur	Type	Puissance Nominale [kW]	Hauteur de nacelle [m]	Diamètre du rotor [m]	Classe IEC
REpower	MM92	2.05	98.5	92.5	IIA
REpower	3.2M114	3.17	93	114	IIIA
GE	2.5-103	2.5	98	103	IIIA
Nordex	N117	2.4	91	117	IIIA

TABLEAU 6 : TYPES D’ÉOLIENNES CONSIDÉRÉS DANS CETTE ÉTUDE

Les courbes de puissance sont données en Annexe 1 sous forme de tableau en fonction de la vitesse du vent.

Ces éoliennes ont été choisies car le site ne comporte aucune maison isolée. On peut donc sans restrictions choisir les éoliennes présentant les risques de nuisances les plus importants sans grever le projet. L’éolienne MM92 servira de référence pour la comparaison des différents résultats.

5.2. Production brute

Les productions brutes (pertes de sillage incluses) pour chaque éolienne et pour l'ensemble du site, calculées selon la méthodologie exposée dans (2), se trouvent dans le tableau ci-dessous. Elles sont présentées en MWh/an et en nombre d'heures équivalentes à pleine puissance (FLEOH¹).

Eolienne	Production brute (MWh/an)			
	MM92	3.2M114	GE2.5-103	N117
1	5 308	7 629	6 224	7 278
2	5 341	7 578	6 251	7 234
3	5 073	7 202	5 937	6 862
4	4 997	6 985	5 838	6 691
5	5 165	7 393	6 055	7 031
6	5 359	7 579	6 270	7 203
7	5 174	7 484	6 074	7 134
8	5 237	7 481	6 137	7 133
Total	41 654	59 331	48 786	56 566
Moyenne	5 207	7 416	6 098	7 071

TABLEAU 7: PRODUCTION BRUTE POUR DES ÉOLIENNES DE TYPE MM92 – 3.2M114 – GE2.5-103 – N117

Eolienne	FLEOH brut (h/an)			
	MM92	3.2M114	GE2.5-103	N117
1	2 589	2 407	2 460	3 032
2	2 606	2 391	2 471	3 014
3	2 474	2 272	2 347	2 859
4	2 437	2 203	2 308	2 788
5	2 520	2 332	2 393	2 930
6	2 614	2 391	2 478	3 001
7	2 524	2 361	2 401	2 973
8	2 555	2 360	2 426	2 972
Moyenne	2 540	2 340	2 410	2 946
Facteur de charge	29.0%	26.7%	27.5%	33.6%

TABLEAU 8: FLEOH BRUT POUR DES ÉOLIENNES DE TYPE MM92 – 3.2M114 – GE2.5-103 – N117

¹ Full Load Equivalent Operating Hours

Eolienne	Rendement (%)			
	MM92	3.2M114	GE2.5-103	N117
1	95.7	94.3	95.5	94.5
2	90.8	87.9	90.3	88.9
3	92.2	89.7	91.8	89.7
4	87.1	83.2	86.4	84.2
5	94.2	92.4	94.0	92.2
6	90.3	87.2	89.8	87.9
7	97.0	96.1	96.9	95.8
8	93.0	90.9	92.7	91.2
Moyenne	92.5	90.2	92.2	90.6
Minimum	87.1	83.2	86.4	84.2

TABLEAU 9: RENDEMENT BRUT POUR DES ÉOLIENNES DE TYPE MM92 – 3.2M114 – GE2.5-103 – N117

Eolienne	Vitesse moyenne (m/s)			
	MM92	3.2M114	GE2.5-103	N117
1	6.4	6.3	6.3	6.2
2	6.5	6.5	6.5	6.4
3	6.3	6.3	6.3	6.2
4	6.5	6.4	6.5	6.4
5	6.3	6.2	6.3	6.2
6	6.6	6.5	6.6	6.5
7	6.2	6.2	6.2	6.1
8	6.4	6.3	6.4	6.3
Moyenne	6.4	6.3	6.4	6.3

TABLEAU 10: VITESSES MOYENNES BRUTES POUR DES ÉOLIENNES DE TYPE MM92 – 3.2M114 – GE2.5-103 – N117

Cette production est calculée pour une masse volumique moyenne de l'air de 1.167 kg/m³ sur l'ensemble du parc, pour des machines non bridées et fonctionnant à 100% de leur courbe de puissance.

On remarque que la 3.2M114 produit le plus, suivie de près par la N117 puis vient la GE2.5 et enfin, loin derrière la MM92. La N117 se démarque parce que malgré une puissance nominale moyenne (2.4MW), elle se retrouve entre la 3.2M114 (3.17 MW) et la GE2.5 (2.53 MW).

Ceci se traduit directement dans le nombre d'heures équivalentes à pleine puissance : la N117 a, de loin, le meilleur résultat.

Par contre, en termes de rendement, toutes les configurations sont relativement pauvres. Les machines à rotor moyen (MM92 et GE2.5) ont un rendement d'à peu près 92% et les machines à grand rotor (3.2M114 et N117) ont un rendement de 90%. Malgré un rotor légèrement plus grand, la N117 s'en sort légèrement mieux que sa concurrente directe, la 3.2M114. Il convient toutefois de noter que la courbe de trainée de la 3.2M114 n'est que préliminaire tandis que celle de la N117 est définitive. Dans ces conditions, Repower pourrait avoir communiqué une version plus pessimiste. Ces rendements sont assez faibles comparativement parlant à ce qui est généralement admis pour les autres projets en Belgique.

On note également que les machines ayant le rendement le plus faible sont toutes situées à droite de la route principale. Ceci se comprend aisément vu que ces machines sont toutes derrière une machine située en amont vis-à-vis de la direction principale du vent. La machine souffrant le plus de ces effets est la machine numéro 4 qui a le rendement le plus faible de toutes (seulement 83.2% pour des 3.2M114).

5.3. Production nette

Afin de déterminer la production nette, les pertes suivantes sont prises en compte :

Pertes	Valeur
Pertes électriques	2.00% (0.8% pour la 3.2M114)
Maintenance des éoliennes	0.50%
Maintenance de la sous-station	0.10%
Indisponibilité du réseau électrique	0.30%
Indisponibilité du réseau télécom	0.30%
Pertes dues à un impact d'éclair	0.20%
Consommation propre des éoliennes, inspections réglementaires, visites	0.40%
Pertes d'hystérésis	0.00%
Pertes dues à la glace	2.00%
Indisponibilité moyenne sur 20 ans	3.38%
Pertes totales	8.86%

TABLEAU 11 : PERTES SUR LA PRODUCTION BRUTE PRISES EN COMPTE

La production nette résultante (moyenne sur 20ans) est de :

Eolienne	Production nette (MWh/an)			
	MM 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
1	4 837	7 042	5 672	6 632
2	4 868	6 994	5 697	6 593
3	4 623	6 647	5 411	6 254
4	4 554	6 447	5 320	6 098
5	4 707	6 823	5 518	6 408
6	4 884	6 996	5 714	6 565
7	4 715	6 908	5 536	6 502
8	4 773	6 905	5 593	6 501
Total	37 961	54 763	44 461	51 552
Moyenne	4 745	6 845	5 558	6 444

TABLEAU 12: PRODUCTION NETTE POUR DES ÉOLIENNES DE TYPE MM92 – 3.2M114 – GE2.5-103 – N117

Eolienne	FLEOH net (h/an)			
	MM 92	3.2M 114	GE2.5-103	N117
1	2 360	2 221	2 242	2 764
2	2 375	2 206	2 252	2 747
3	2 255	2 097	2 139	2 606
4	2 221	2 034	2 103	2 541
5	2 296	2 153	2 181	2 670
6	2 382	2 207	2 259	2 735
7	2 300	2 179	2 188	2 709
8	2 328	2 178	2 211	2 709
Moyenne	2 315	2 159	2 197	2 685
Facteur de charge	26.4%	24.7%	25.1%	30.7%

TABLEAU 13: FLEOH NET POUR DES ÉOLIENNES DE TYPE MM92 – 3.2M114 – GE2.5-103 – N117

Le tableau présente une moyenne de la production sur 20 ans. Dans le cadre d'une analyse financière, la variation d'indisponibilité, et donc de production, au fil des ans doit être considérée.

5.4. Certification des turbines

Puisque le paramètre k de Weibull est effectivement supérieur à 1,8 d'après la vitesse moyenne obtenue à partir du climat de vent local (Tableau 5), les relations supposées dans la norme IEC 61400-1 (3) entre la vitesse de vent moyenne, vitesse de vent de référence² et la vitesse de vent extrême³ peuvent théoriquement être considérées valable. De ce fait, la vitesse de vent moyenne détermine la classe d'éolienne selon la norme IEC 61400-1.

La vitesse moyenne calculée montre que les éoliennes doivent être certifiées au minimum suivant la classe III de la norme IEC 61400-1. La vitesse de vent extrême pour laquelle les turbines sont certifiées est alors de 52.5 m/s maximum, ce qui correspond à une vitesse de vent de référence de 37.5 m/s.

Suivant la norme NBN B03-002-1 (4) l'intensité des turbulences ambiantes est supposée indépendante de la direction et de la vitesse de vent. Toujours suivant la même norme, la classe des terrains environnants est III et l'intensité des turbulences ambiante à hauteur d'axe (par exemple pour la MM92 à 98.5 m) est de 15.7 %. En sommant les turbulences induites, calculées suivant la méthodologie de (2), avec ces turbulences ambiantes, on obtient l'intensité de turbulence totale. La valeur maximale attendue pour trois vitesses de vent dans l'intervalle $[0,2v_{ref}; 0,4v_{ref}]$ est reportée au tableau ci-dessous.

² v_{ref} = valeur extrême de la vitesse de vent moyenne sur 10 min, avec une période de retour de 50 ans

³ v_{e50} = vitesse de vent extrême (moyenne sur 3 secondes) avec une période de retour de 50 ans

MM 92	Niveau de turbulences		
Vitesse de vent	8 m/s	12 m/s	15 m/s
Turbulence ambiante	15.7%		
Turbulence totale	22.5%	17.9%	16.8%
Critère IEC - Classe A	23.2%	19.5%	18.0%
Acceptabilité	OK	OK	OK

3.2M 114	Niveau de turbulences		
Vitesse de vent	8 m/s	12 m/s	15 m/s
Turbulence ambiante	15.9%		
Turbulence totale	22.9%	18.4%	17.1%
Critère IEC - Classe A	23.2%	19.5%	18.0%
Acceptabilité	OK	OK	OK

GE2.5-103	Niveau de turbulences		
Vitesse de vent	8 m/s	12 m/s	15 m/s
Turbulence ambiante	15.9%		
Turbulence totale	22.9%	18.4%	17.1%
Critère IEC - Classe A	23.2%	19.5%	18.0%
Acceptabilité	OK	OK	OK

N 117	Niveau de turbulences		
Vitesse de vent	8 m/s	12 m/s	15 m/s
Turbulence ambiante	15.9%		
Turbulence totale	22.0%	17.7%	16.9%
Critère IEC - Classe A	23.2%	19.5%	18.0%
Acceptabilité	OK	OK	OK

TABLEAU 14: VÉRIFICATION DES NIVEAUX DE TURBULENCES

On voit que les éoliennes doivent être certifiées au minimum suivant la classe IEC A de la norme internationale IEC 61400 – 1 (3). Les éoliennes considérées répondent à ces exigences.

Les valeurs de turbulence maximales sont presque toujours atteintes au niveau de l'éolienne numéro 4.

Il est à noter que les données fournies par le constructeur REpower concernant la courbe de traînée de la machine 3.2M114 sont toujours préliminaires.

De plus, pendant la phase d'achat des éoliennes, les fabricants de l'éolienne choisie évalueront eux-mêmes également les risques liés aux turbulences suivant des paramètres techniques spécifiques qui ne sont pas disponibles pour les parties tierces.

6. ANALYSE D'INCERTITUDE

Pour analyser la précision du calcul de production, les marges d'erreur des paramètres statistiquement indépendants qui entrent en ligne de compte ont été évaluées et sont reportées ci-dessous. Ces paramètres sont présentés plus en détails dans (2) :

Type	Effet sur	Niveau (%)
Mesure de vent		2.5
Variabilité interannuelle	vitesse de vent	8.0
Extrapolation verticale par WAsP		2.0
Données d'Input, obstacles		2.0
Pertes et disponibilités		0.0
Perte de sillage (modèle WindPRO)	production	30 % des pertes de sillage
Courbe de puissance		10
Variabilité à long terme du vent		6.5

TABLEAU 15: INCERTITUDES

Selon la méthodologie de (2), sur la base de ces niveaux d'incertitudes indépendantes, on en déduit pour chaque type de turbine utilisée les degrés d'incertitudes pour un intervalle de confiance de 95% (Tableau 16) et les valeurs de P90 associées (Tableau 18)

Niveaux d'incertitudes à 95% de confiance		M M 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
1an	%	21.7%	22.1%	22.0%	20.0%
10 ans		15.3%	15.5%	15.4%	14.7%
20 ans		14.8%	15.0%	14.9%	14.4%

TABLEAU 16: INCERTITUDES NETTES À L'HORIZON 1, 10 ET 20 ANS

FLOEH90 net		M M 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
1an	h/an	1986	1847	1881	2 334
10 ans		2 084	1941	1976	2 427
20 ans		2 090	1947	1982	2 433

TABLEAU 17: FLEOH NETTES À L'HORIZON 1, 10 ET 20 ANS

	P 90 nette		M M 92	3.2M 114	GE2.5-103	N 117
Total pour le parc	1an	MWh/an	32 569	46 851	38 065	44 813
	10 ans		34 172	49 214	39 989	46 595
	20 ans		34 281	49 376	40 121	46 713
Eolienne moyenne	1an	MWh/an	4 071	5 856	4 758	5 602
	10 ans		4 271	6 152	4 999	5 824
	20 ans		4 285	6 172	5 015	5 839

TABLEAU 18: P90 NETTE À L'HORIZON 1, 10 ET 20 ANS

7. BIBLIOGRAPHIE

1. **Cellule Eolienne.** *Cadre de référence pour l'implantation d'éoliennes en région wallonne.* 2002.
2. **Tractebel Engineering (GDF SUEZ).** *Principes et méthodologie - Etude de pré faisabilité et de faisabilité.* Bruxelles (Belgique) : Power & Gas - Tractebel Engineering (GDF SUEZ), 2010. WINDDEV/4DO/154886/000/00.
3. **Norme IEC 61400-1.** *Wind turbines - Part 1 : Design requirements.* 3ième édition. 2005.
4. **Norme NBN B03-002-1.** *Actions du vent sur les constructions - Généralités - Pression du vent sur une paroi et effets d'ensemble du vent sur une construction.* 1988.
5. **Tractebel Engineering (GDF SUEZ).** *Belgian Wind Atlas 2 - New methodology for validation.* Bruxelles (Belgique) : Power & Gas - Tractebel Engineering (GDF SUEZ), 2009. WINDASS/4NT/142784/000/00.

ANNEXE 1 : COURBES DE PUISSANCE

Power curve				
MM92		3.2M114	2.5	N117
Wind speed [m/s]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	20	18	14	25
3	94	144	100	154
4	205	319	246	354
5	391	590	465	643
6	645	969	764	1038
7	979	1460	1157	1525
8	1375	2017	1619	2037
9	1795	2576	2054	2326
10	2000	3009	2358	2400
11	2040	3170	2499	2400
12	2050	3170	2530	2400
13	2050	3170	2530	2400
14	2050	3170	2530	2400
15	2050	3170	2530	2400
16	2050	3170	2530	2400
17	2050	3170	2530	2400
18	2050	3170	2530	2400
19	2050	3170	2530	2400
20	2050	3170	2530	0
21	2050	3170	2530	0
22	2050	0	2530	0
23	2050	0	2530	0
24	0	0	2530	0
25	0	0	0	0

