



# **Procédure d'évaluation du potentiel éolien - Note méthodologique**

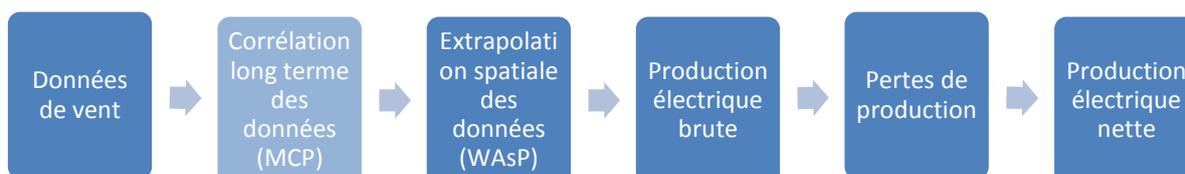
***Diffusion : public***

***Avril 2015***

## 1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA PROCÉDURE D'ÉVALUATION DU POTENTIEL ÉOLIEN

L'évaluation du potentiel éolien repose sur la prévision du climat local de vent à hauteur de nacelle de chaque éolienne du parc. Les distributions des vitesses calculées sont ensuite combinées à la courbe de puissance de l'éolienne pour calculer la production électrique brute du parc éolien. Les pertes de production systématiques ainsi que les pertes par effet de sillage sont ensuite évaluées et déduites pour déterminer la production électrique nette du projet.

Les principales étapes de la procédure d'évaluation sont schématisées à la figure suivante.



Les différentes méthodes d'évaluation du potentiel éolien reposent sur un même principe : un modèle d'écoulement du vent alimenté par des données météorologiques et un modèle de terrain permet d'extrapoler horizontalement et verticalement les données de vent d'un point A (station météorologique ou mat de mesures) vers un point B (nacelle de l'éolienne).

Les méthodes d'évaluation du potentiel éolien peuvent ensuite être différenciées suivant la nature du modèle d'écoulement de vent utilisé (linéaire, CFD) et/ou suivant la nature des données de vent utilisées (mesures sur site ou stations météorologiques). Pour la suite, nous présentons les deux principales approches utilisées dans nos études pour prédire le climat de vent local :

- Méthode n°1 : Stations météorologiques + Modèle d'écoulement vent
- Méthode n°2 : Mesures de vent réalisées in situ + Modèle d'écoulement vent

Les données de vent utilisées doivent être représentatives du climat moyen. Le vent pouvant être sujet à des variations annuelles importantes, la normale de vent est traditionnellement donnée sous la forme de valeur moyenne calculée sur une période minimale de 10 ans. Lorsqu'on réalise des mesures de vent à l'aide d'un mat installé sur site, les données mesurées (généralement pendant 1 an) doivent préalablement être extrapolées sur une période minimale 10 ans. Cette étape est généralement réalisée en appliquant des techniques de corrélation avec des données de référence provenant de stations ou de modèles météorologiques.

Le modèle d'écoulement utilisé dans le cadre de nos études est le modèle WASP, référence internationale, le plus largement utilisé et validé dans l'industrie éolienne pour la prévision du vent et la production des parcs éoliens; il a été développé par l'institut DTU au Danemark.

Le principe de WASP est de corriger les données de vent de l'influence de leur environnement (obstacles, relief et rugosité...) pour générer des statistiques de vent représentatives du vent régional. WASP tient compte de l'influence du relief, de la couverture de terrain et de la stabilité de l'atmosphère sur l'écoulement du vent. Le modèle WASP applique ensuite ces statistiques au site étudié pour prédire le climat de vent local.

WASP est un modèle d'écoulement linéaire, adapté aux terrains non complexes. La complexité du site est évaluée à partir d'un indicateur, appelé RIX (Ruggedness Index) qui évalue les pentes du terrain environnant. La valeur de RIX doit être proche de 0% pour respecter l'enveloppe de performance du modèle.

La première méthode si elle a fait l'objet d'une validation appropriée permet de prédire rapidement et de manière fiable la production d'un parc éolien. En terrain complexe et/ou pour améliorer la précision des prévisions, des mesures de vent complémentaires sur site peuvent être recommandées par la suite.

## 2. INCERTITUDES ET INTERVALLES DE CONFIANCE

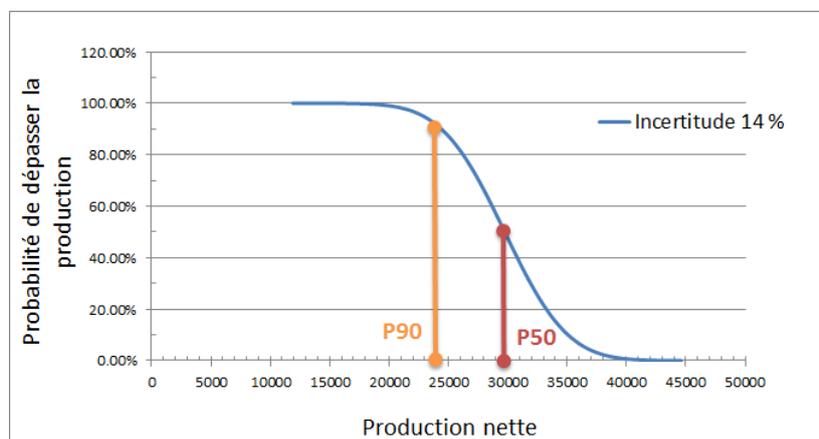
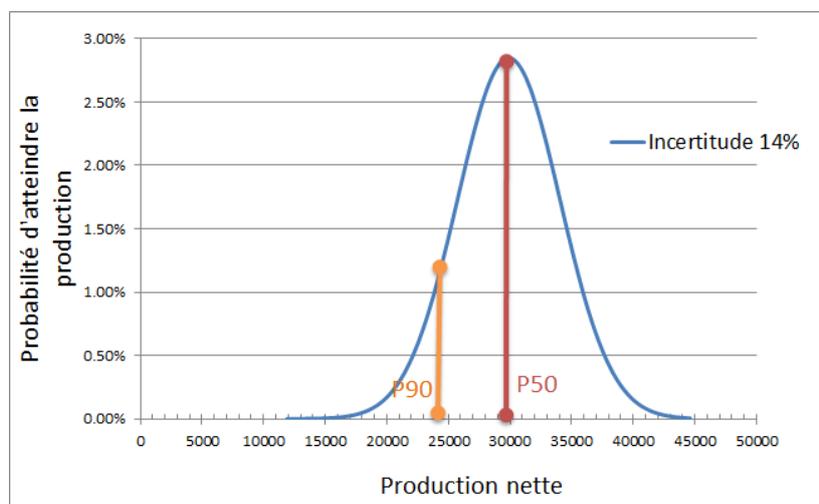
La production d'un parc éolien est calculée à l'issue de plusieurs étapes qui comportent des incertitudes intrinsèques à toute modélisation. La démarche adoptée consiste pour chaque étape de l'étude à se placer aux caractéristiques moyennes les plus probables du site et des équipements. La production calculée est alors celle qui présente la plus forte probabilité d'être obtenue (le P50).

Les incertitudes au cours de l'étude peuvent être estimées afin de dégager une incertitude globale qui permet de calculer une production avec des probabilités de dépassement. Les intervalles de confiance sont calculés en faisant l'hypothèse que la production électrique du parc suit une loi de distribution normale pour laquelle l'erreur type est égale à l'incertitude totale.

Les figures ci-dessous permettent d'illustrer ces définitions. Par exemple, si l'on considère un seuil de dépassement de 90%, la production électrique associée à ce seuil (P90) a une probabilité de 90 % d'être dépassée. Ces seuils de dépassement sont généralement utilisés lors de l'analyse économique du projet pour réaliser des analyses de sensibilité et établir le profil de risque du projet.

Sur base de ces définitions, la production calculée (P50) doit être considérée comme la production de référence du projet.

Figure 1 Intervalles de confiance sur les calculs de production



### 3. PROCÉDURE D'ÉVALUATION DU POTENTIEL ÉOLIEN À PARTIR DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Lorsqu'aucune mesure de vent n'est disponible sur le site, l'évaluation du potentiel éolien s'appuie sur le modèle d'écoulement du vent WASP et sur les données de vent des stations météorologiques disponibles dans la région en suivant la méthode du « Wind Atlas Analysis And Application Program » [1].

Le principe de cette méthode est de corriger les données mesurées de l'influence de leur environnement (obstacles, relief et rugosité...) pour générer des statistiques de vent représentatives du vent régional. WASP tient compte de l'influence du relief, de la couverture de terrain et de la stabilité de l'atmosphère sur l'écoulement du vent. Le modèle WASP applique ensuite ces statistiques au site étudié pour prédire le climat de vent local. Les statistiques de vent sont pondérées en fonction de la distance qui les sépare du site, en accordant un poids plus élevé aux stations les plus proches.

Les performances de cette méthode de prévision dépendent en grande partie de la qualité des données d'entrée, en particulier des données météorologiques utilisées. Après une sélection rigoureuse des données de vent et une validation préalable, cette méthode permet de prédire rapidement et de manière fiable la production d'un parc éolien

#### 3.1. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données de vent doivent être représentatives du vent régional et doivent pour ce faire répondre à des critères de sélection stricts :

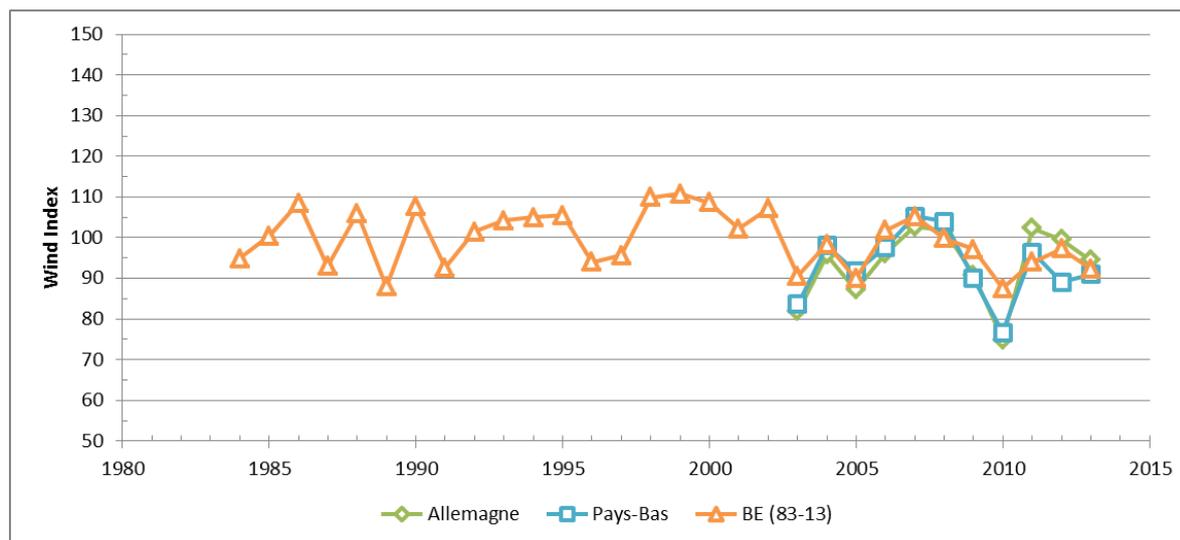
- Critère n°1 : les mesures doivent être peu influencées par l'environnement du site afin d'être représentatives du vent régional. Seules les stations inventoriées classe 1 par l'IRM (la plus exigeante en termes de dégagement par rapport aux obstacles) ont été retenues
- Critère n°2 : Les mesures doivent couvrir une période de minimum 10 années avec un taux de disponibilité de minimum 90 % afin d'être représentatives d'une année normale de vent
- Critère n°3 : l'historique de la station doit être documenté pour vérifier et garantir la continuité du dispositif de mesures
- Critère n°4 : les mesures doivent satisfaire aux tests de consistance entre les données. Ces tests sont réalisés en analysant les tendances entre données ; un décrochage subit permet par exemple d'identifier un incident technique ou le remplacement d'un appareil, une déviation progressive permet d'identifier un biais dans les appareils de mesures ou une modification de l'environnement du mat.

Cinq stations météorologiques satisfont à l'ensemble de ces critères et ont finalement été retenues pour les prévisions de vent à l'échelle du territoire Wallon : Chièvres, Beauvechain, Bierset, Florennes et Elsenborn.

Les données sélectionnées sont des données météorologiques récentes et ne remontent pas au-delà de 2001. Sur les périodes antérieures, des modifications importantes ont affectés la plupart des stations météorologiques : déplacement du mat, remplacement des équipements, modification du format d'enregistrement des données,..... L'homogénéité des données avant 2001 ne peut être assurée ce qui nous a conduit à écarter les données mesurées avant cette date.

La représentativité des 10 années retenues (2001-2010) par rapport aux trente dernières années (1984-2013) a été analysée en comparant les index de vent de ces deux périodes. Un index de vent indique, en pourcent, le niveau de production d'une éolienne sur une période donnée par rapport à une période de référence. L'index de vent moyen calculé sur la période 2001-2010 s'élève en Belgique à 98 contre 100 pour la période 1984-2013 : la période retenue est légèrement moins ventée (2%) que la moyenne des 30 dernières années. L'index de vent calculé à l'aide d'une source de données météorologiques<sup>1</sup> homogènes dans le temps est illustré à la figure suivante et comparé aux index disponibles pour les pays limitrophes.

**Figure 2** Index de vent pour la Belgique et les pays limitrophes



### 3.2. MODÈLE DE TERRAIN

Le modèle de terrain est construit à partir des données suivantes ;

- Les courbes de niveau avec une résolution verticale de minimum 5 m sont générées à partir du modèle numérique de terrain SRTM complétées par l'analyse de données exogènes (cartes topographiques). Les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission Data) sont des données d'altitude du sol mesurées par la navette Endeavour en 2000.
- Les courbes de rugosité sont générées à partir de la base de données Corinne Land Cover [2] complétées par l'analyse de données exogènes (photos aériennes). Corinne Land Cover est une base de données vectorielle sur l'occupation des sols, créée principalement à partir d'images satellites. Une longueur de rugosité est assignée à chaque code de la base de données Corinne Land Cover.
- Les obstacles sont modélisés sur base des fiches d'obstacles inventoriés par l'IRM/KMI et des photographies aériennes récentes.

Pour tenir compte de l'influence du modèle de terrain en amont, le relief et la rugosité sont modélisés respectivement sur un rayon de 7 km et 25 km autour du site.

<sup>1</sup> MERRA : MODERN ERA RETROSPECTIVE-ANALYSIS FOR RESEARCH AND APPLICATIONS, Données issues du modèle de prévision météorologique développé par la NASA

### 3.3. VALIDATION DE LA MÉTHODE

Les performances du modèle de prévision du vent à partir de stations météorologiques ont été évaluées afin de connaître d'une part l'aptitude de cette méthode à reconstruire le régime de vent en tout point du territoire wallon et d'autre part afin de préciser les intervalles de confiance dans les résultats.

#### ***Test 1 : Validation par corrélation croisée entre les stations météorologiques***

Le test de validation repose sur la comparaison du climat de vent observé au droit des stations météorologiques avec le climat de vent calculé à partir du modèle d'écoulement WAsP et des autres stations météorologiques disponibles dans la région

La comparaison a été effectuée sur deux paramètres ; d'une part sur la vitesse moyenne du vent et d'autre part sur la densité de puissance du vent.

La puissance du vent étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, les vitesses de vent élevées disposent du potentiel énergétique le plus fort. La densité de puissance permet d'en tenir compte en calculant la puissance de chaque plage de vitesse multipliée par sa fréquence d'occurrence. Ce paramètre est le plus à même de caractériser les performances énergétiques du modèle de calcul.

Les résultats de l'évaluation sont donnés aux deux tableaux suivants.

**Tableau 1 Comparaison des vitesses moyennes observées et calculées**

STATIONS	VALEUR OBSERVÉE (M/S)	VALEUR CALCULÉE (M/S)	DÉVIATION (%)
Beauvechain	3,89	3,96	2%
Bierset	4,1	4,05	-1%
Florennes	3,87	3,77	-3%
Elsenborn	3,39	3,47	2%
Chièvres	3,96	3,93	-1%

**Tableau 2 Comparaison des densités de puissance observées et calculées**

STATIONS	VALEUR OBSERVÉE (W/M <sup>2</sup> )	VALEUR CALCULÉE (W/M <sup>2</sup> )	DÉVIATION (%)
Beauvechain	80	80	-1%
Bierset	84	87	3%
Florennes	72	67	-7%
Elsenborn	49	53	9%
Chièvres	84	80	-4%

On observe aux tableaux précédents que l'écart maximal entre les valeurs observées et calculées s'élève à maximum 3 % sur la vitesse moyenne du vent et 9 % sur la densité de puissance.

#### ***Test 2 : Validation à partir des données de production de parcs éoliens en exploitation***

Ce deuxième test de validation été réalisé en comparant la production calculée par le modèle de prévision avec la production observée sur plusieurs parcs éoliens en exploitation en Wallonie.

Les données de production proviennent d'une quinzaine de parcs éoliens cumulant une puissance installée de plus de 200 MW, en exploitation depuis minimum 2 ans. Les parcs existants couvrent l'ensemble du territoire de la Région Wallonne (distance couverture : maximum 40 km).

Les données de production observées (données mensuelles par éolienne) ont préalablement été analysées et traitées pour pouvoir être comparées à la production calculée. La procédure de traitement des données comporte les étapes suivantes :

- Test de plausibilité sur les données de production et si requis filtrage des données incohérentes
- Correction des données de production pour tenir compte des périodes d'indisponibilité technique de l'éolienne
- Ajustement des données de production avec l'index de vent pour normaliser la production sur une période de 30 ans
- Evaluation et déduction des pertes de production afin d'obtenir la production électrique nette du parc éolien

Notons que les ajustements réalisés sur les données de production observées comportent des incertitudes qui peuvent être estimées à 5%.

La production observée ainsi ajustée est comparée à la production calculée à partir des stations météorologiques et du modèle d'écoulement WAsP. La production calculée tient compte des caractéristiques techniques des éoliennes installées et de la configuration du parc éolien.

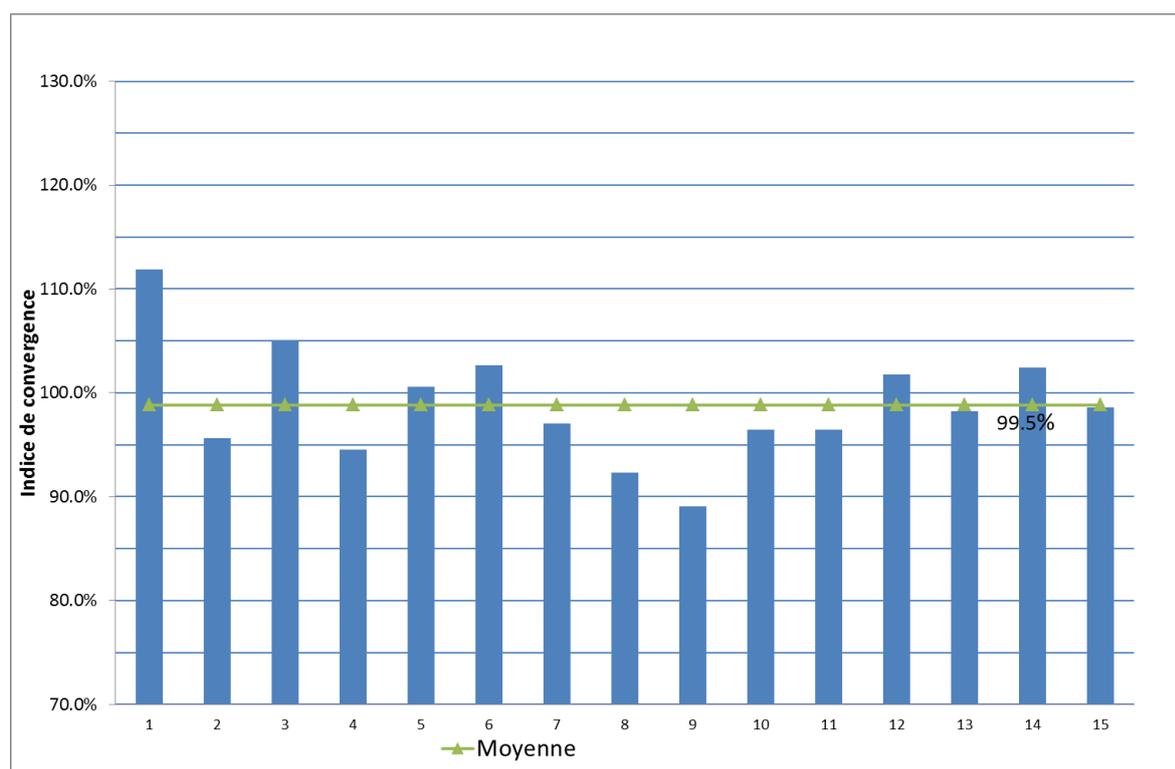
Les performances du modèle de prévision sont analysées à l'aide d'un indice de convergence défini comme le rapport entre la production calculée et la production observée déduite des données de production :

Indice Convergence = Production Calculée/ Production Observée

Un indice de 90 % signifie que la production calculée sous-évalue de 10 % la production observée. A l'inverse, un indice de 110 % signifie que le modèle surestime de 10% la production observée sur le parc éolien.

Les résultats du test de validation sont présentés à la figure suivante pour l'ensemble des parcs éoliens analysés.

Figure 3 Comparaison entre production observée et calculée sur 15 parcs existants



Le test de validation réalisé à partir des données de production permet de tirer la conclusion suivante : **en moyenne, sur l'ensemble des parcs étudiés, la production calculée sous-estime de 0.5% la production observée (indice de convergence moyen de 99.5%).**

En conclusion, on observe une très bonne concordance entre la production calculée et la production observée sur plusieurs parcs éoliens en fonctionnement sur le territoire Wallon. Il n'est dès lors pas nécessaire d'apporter une correction systématique sur le modèle de prévision : la production calculée doit être considérée comme la production de référence du projet.

## 4. LOGICIELS UTILISÉS

---

L'évaluation du potentiel éolien s'appuie sur l'utilisation de plusieurs logiciels :

- WINDPRO VERSION 2.9, EMD International
- Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP), Version 11, DTU International

---

## BIBLIOGRAPHIE & RÉFÉRENCES

---

- [1] [European Wind Atlas](#). Risø National Laboratory, Troen & Petersen, 1989
- [2] Corine Land Cover Data Base, European Environment Agency, 2006
- [3] Measnet, Evaluation of site specific wind conditions, 2009
- [4] IEA, Wind speed measurement and use of cup anemometry, Second Print 2003
- [5] UCL-KMI-VITO-3E, Improved Prediction of Wind Power in Belgium, 2006,
- [6] Standard Loss Definitions for Wind Resource/ Energy Assessments, AWEA 2008, Steve Jones, Global Energy Concepts
- [7] IEC61400-1 ed3 (2005), Wind Turbines, Part 1 : Design Requirements
- [8] WASP standard parameters , “WAsP and forests”, WAsP 9 Help Facility
- [9] Optimising the parametrisation of forests for WAsP wind speed calculations; a retrospective empirical study, GL Garrad Hassan, J.F Corbett