

# 3. ENERGIE

<b>3.0 Introduction et guide .....</b>	<b>157</b>
3.0.0 Introduction .....	157
3.0.0.0 Création d'une Statistique éolienne.....	158
3.0.0.1 Création d'une carte de ressources éoliennes .....	158
3.0.0.2 Calcul du productible annuel d'un parc éolien.....	159
3.0.0.3 Optimisation de la disposition d'un parc.....	159
3.0.1 Guide des étapes à suivre pour calculer un productible annuel .....	159
3.0.1.0 Calcul à partir des mesures locales, sans modèle.....	159
3.0.1.1 Calcul à partir de statistiques éoliennes, avec le modèle ATLAS .....	159
3.0.1.2 Calcul à partir de statistiques éoliennes, avec le modèle WAsP .....	160
3.0.1.3 Calcul d'une Statistique éolienne (requiert WAsP).....	160
3.0.1.4 Calcul d'une carte des ressources éoliennes (requiert WAsP) .....	160
<b>3.1 Notions fondamentales .....</b>	<b>161</b>
3.1.0 Données nécessaires pour calculer un productible.....	161
3.1.1 Distribution annuelle des vitesses du vent .....	161
3.1.1.0 Méthodes pour établir la distribution des vitesses du vent.....	162
3.1.2 Fitting Weibull Parameters for Wind Energy Applications .....	164
3.1.2.0 The Weibull Distribution.....	164
3.1.2.1 Estimating Moments in the Sample (Measured/Observed) Distribution.....	164
3.1.2.2 The Wind Power Density .....	164
3.1.2.3 Estimating the Weibull Parameters for Wind Energy Applications .....	165
3.1.3 Courbe de puissance et courbe de Ct.....	166
<b>3.2 Calculs et modèles .....</b>	<b>167</b>
3.2.0 Introduction .....	167
3.2.1 Méthode du Wind Atlas (ATLAS, WAsP-Interface et RESSOURCE).....	167
3.2.1.0 Comparaison d'ATLAS et de WAsP .....	167
3.2.1.1 Statistiques éoliennes régionales .....	168
3.2.1.2 Description de la rugosité .....	169
3.2.1.3 Description du relief avec ATLAS.....	173
3.2.1.4 Description des obstacles avec ATLAS .....	174
3.2.1.5 Description du relief et des obstacles avec WAsP.....	174
3.2.1.6 Calculs effectués par RESSOURCE .....	174
3.2.2 Calculs à partir des mesures de vent .....	175
3.2.3 Description du modèle PARK (pertes dues aux sillages).....	176
3.2.3.0 Utilisation de plusieurs jeux de données.....	177
3.2.4 Création d'un atlas éolien (ensemble de Statistiques éoliennes).....	177
3.2.5 WAsP model – focus on changes from WAsP 10.0 .....	177
<b>3.3 Entrée des données.....</b>	<b>182</b>
3.3.0 Introduction .....	182
3.3.1 Entrée des données pour les calculs avec MODELES .....	183
3.3.1.0 Objet Données-site. Onglet Position/Usage .....	183
3.3.1.1 Objet Données-site. Onglet Statistiques éoliennes .....	184
3.3.1.2 Objet Données-site. Onglet Rugosité .....	187
3.3.1.3 Objet Données-site. Onglet ATLAS collines et obstacles .....	189
3.3.1.4 Objet Données-site. Onglet WAsP: orographie et obstacles .....	190
3.3.1.5 Objet Données-site. Onglet Fichiers et étendues des données .....	191
3.3.1.6 Entrée des obstacles pour les calculs avec WAsP .....	193
3.3.2 Objet Météo : entrée, examen et nettoyage des données de vent .....	194
3.3.2.0 Compatibilité avec les versions 2.5 et antérieures .....	194
3.3.2.1 Onglet Guide.....	195
3.3.2.2 Onglet Usage.....	198
3.3.2.3 Onglet Données.....	198
3.3.2.4 Onglet Graphiques .....	211
3.3.2.5 Onglet Statistiques .....	218

3.3.2.6 Onglet Cisaillement.....	220
3.3.2.7 Onglet Rapport .....	221
3.3.3 Météo-analyser .....	222
3.3.3.0 Calendrier des périodes avec données des différents mâts de mesures .....	223
3.3.3.1 Substituer des valeurs dans une série de données .....	224
3.3.3.2 Contrôle croisé des extrapolations verticales et horizontales faites avec WAsP.....	226
3.3.3.3 Génération d'une Distribution temporelle .....	230
3.3.4 Entrées des données pour un calcul PARK .....	231
<b>3.4 Calculs et rapports.....</b>	<b>232</b>
3.4.0 Calculs avec PARK (productible annuel d'un parc éolien, RIX, etc.) .....	233
3.4.0.0 Calcul du Productible annuel.....	233
3.4.0.1 Calcul de la Distribution du productible annuel .....	239
3.4.0.2 Calcul du RIX.....	243
3.4.0.3 Calcul PARK avec les options « avancées » .....	245
3.4.0.4 Modification du paramétrage de WAsP .....	249
3.4.1 Calcul avec METEO (productible d'une machine isolée) .....	250
3.4.2 Calculs avec MODELES.....	254
3.4.2.0 Calcul WAsP-Interface.....	254
3.4.2.1 Calcul ATLAS .....	254
3.4.2.2 Calcul RESSOURCE .....	254
3.4.2.3 Calcul WAsP-CFD .....	255
3.4.3 Calcul STATGEN (statistique éolienne méthode du Wind Atlas) .....	255
3.4.4 Conversion de la correction de productible en correction de la vitesse du vent .....	257
3.4.4.0 Statistique créée à partir d'un calcul MCP (méthode indicielle) .....	258
3.4.4.1 Ancienne statistique avec facteur de correction .....	258
3.4.4.2 Correction régionales DK'92 –DK07 des statistiques éoliennes du Danemark .....	259
3.4.5 Affichage et lecture des rapports.....	260
3.4.5.0 Affichage des rapports.....	260
3.4.5.1 Lecture des rapports.....	262
3.4.5.2 Enregistrer les résultats dans des fichiers.....	268
<b>3.5 Pertes, incertitudes et vérifications.....</b>	<b>272</b>
3.5.0 Introduction .....	272
3.5.1 Pertes et incertitudes .....	272
3.5.1.0 Pertes.....	272
3.5.1.1 Incertitudes .....	273
3.5.2 Vérification des courbes de puissance .....	274
3.5.3 Vérification des productibles à partir des éoliennes existantes .....	277
3.5.4 Vérification des productibles en utilisant plusieurs sources de données du vent .....	277
3.5.4.0 Synthèse d'études de cas .....	278
3.5.4.1 Exemples de données de vent incertaines et conséquences .....	279
3.5.4.2 Vérification à l'aide d'atlas éoliens.....	279
<b>3.6 Cartes de ressources éoliennes .....</b>	<b>281</b>
3.6.0 Introduction .....	281
3.6.1 Données nécessaires au calcul d'une carte de ressources éoliennes.....	281
3.6.1.0 Rugosités.....	281
3.6.1.1 Données altimétriques .....	282
3.6.1.2 Statistiques éoliennes.....	282
3.6.1.3 Obstacles.....	282
3.6.2 Entrée des données pour les calculs avec RESSOURCE .....	283
3.6.3 Réalisation d'une carte de ressources éoliennes .....	285
3.6.3.0 PC multi-processeurs .....	287
3.6.4 Affichage et impression d'une carte de ressources éoliennes .....	289
3.6.5 Affichage des roses des ressources sur la carte.....	289
3.6.5.0 Affichage des roses aux emplacements des objets Données-site .....	291

## 3.0 Introduction et guide

### 3.0.0 Introduction

Le calcul du productible est l'une des tâches les plus importantes d'un projet éolien. La production annuelle d'énergie d'une éolienne peut varier énormément selon la région, même dans un petit pays comme le Danemark. Etant donné que les coûts d'installation et d'exploitation des éoliennes sont peu dépendants du lieu (excepté pour les installations offshore beaucoup plus coûteuses), la viabilité d'un projet dépend essentiellement de sa localisation. Dans une même région, le choix du site est également très important et des facteurs tels que l'altitude, la distance entre les éoliennes, la disposition des éoliennes ont une influence importante sur le productible.

Aux nombreuses options de calcul proposées, WindPRO ajoute une très grande flexibilité (c'est probablement, l'outil le plus flexible de sa catégorie) permettant de combiner des informations de formats et de nature différentes telles que des données de vent (ayant des formats différents) avec des éoliennes (existantes et/ou nouvelles) de hauteurs et de types différents. De plus, un effort important a été fait pour développer des routines intelligentes qui vérifient la pertinence des données entrées et des résultats obtenus afin que l'utilisateur puisse obtenir les résultats et produire les documents les plus fiables possibles.

Depuis la version 2.7, le module PARK de WindPRO permet de calculer le productible d'un parc en fonction de la période de l'année.

Depuis la version 2.7, le module RESSOURCE a été intégré au module MODELE. RESSOURCE permet de réaliser des cartes de ressources éoliennes aussi bien à grande échelle, pour l'identification des régions les plus appropriées à l'exploitation de l'énergie éolienne, qu'à petite échelle pour déterminer les meilleurs emplacements pour l'érection des éoliennes d'un parc (micro-siting).

Un des grands avantages de RESSOURCE est sa capacité à calculer, en une seule opération, les ressources de surfaces très étendues. Ainsi, l'atlas éolien du Danemark, avec une résolution de 200 mètres, a été réalisé avec RESSOURCE.

Un autre avantage est la possibilité d'afficher à l'écran la carte des ressources éoliennes calculée, ce qui est extrêmement pratique pour optimiser, manuellement, la disposition d'un parc.

Pour l'optimisation automatique de l'implantation des éoliennes d'un parc, reportez-vous à section 8.

Pour les calculs faisant appel aux modèles numériques d'écoulements (CFD), reportez-vous à la section 9.

Pour corriger des mesures de vent faites sur une courte période, afin de les rendre représentatives du long terme, reportez-vous à la section 11.

Pour les calculs des pertes et des incertitudes, reportez-vous à la section 12.

Les modules utilisés pour calculer les productibles sont les suivant :

- METEO : ce module est composé de l'objet *Météo* qui permet d'importer/nettoyer/analyser les mesures de vent et de l'outil *Météo-analyser* qui permet de faire des contrôles croisés, des substitutions de données, etc. METEO permet également de faire des calculs de productible directement à partir des mesures de vent.
- MODEL : ce module incorpore ATLAS qui est un modèle basique d'écoulement du vent, l'interface avec le modèle WAsP, l'interface avec les modèles CFD et RESSOURCE.
- MCP/STATGEN : ce module permet de corriger les mesures de vent pour les rendre représentatives du long terme et de générer une statistique éolienne régionale à partir des mesures corrigées, voir section 11.
- PARK : ce module permet de calculer les pertes dues sillages des éoliennes, l'intensité des turbulences et le productible d'un parc en fonction de la période de l'année. PARK peut calculer les productibles à partir de METEO (valable en terrain simple si on considère que les conditions de vent sont identiques dans tout le parc) ou à partir de MODELE (les caractéristiques du vent sont calculées à l'emplacement de chaque éolienne avec le modèle d'écoulement utilisé, avant de calculer les effets des sillages).

La suite donne quelques explications supplémentaires :

**METEO** – Ce module permet de calculer le productible d'une éolienne à l'emplacement précis où les mesures du vent ont été faites. Si la région est plate et totalement dégagée, les calculs faits à l'emplacement des mesures sont aussi valables pour les zones environnantes.

Si le vent a été mesuré à une hauteur différente de celle de l'éolienne que l'on veut utiliser pour faire le calcul du productible, on peut extrapoler les mesures à hauteur de moyeu en entrant l'exposant de la formule du gradient du vent (formule donnant la vitesse du vent en fonction de la hauteur). Cette méthode doit être utilisée avec la plus grande prudence car les lois de variations de la vitesse du vent ne sont simples qu'en terrain plat et de faible rugosité.

Comme indiqué antérieurement ce module permet le traitement des mesures de vent avec l'objet *Météo*. Quand on dispose des mesures issues de plusieurs mâts, l'outil *Météo-analyser* permet de comparer les mesures, de réaliser des substitutions de données et de faire des contrôles croisés. Pour faire certains calculs, il est nécessaire de disposer de données de vent avec une périodicité élevée couvrant une année ; si vous ne disposez de données avec ces caractéristiques, le *Météo-analyser* permet de les générer à partir des données disponibles par des opérations d'interpolation et remplissage.

Le module METEO est principalement utilisé pour l'importation et le traitement des mesures de vent en vue de leur utilisation ultérieure pour la génération d'une *Statistique éolienne* avec WASP.

**MODELE, ATLAS** – Le calcul de productible se fait à partir de la description du terrain (rugosités, obstacles et collines de formes simples) et d'une *Statistique éolienne*. Il met en œuvre un modèle simple d'écoulement du vent appelé ATLAS qui reprend la méthode du Wind Atlas.

La description des rugosités est identique à celle de WASP, par contre, étant donné les limitations du modèle d'écoulement utilisé, la description du relief et des obstacles est moins élaborée que dans WASP. Par conséquent, l'utilisation d'ATLAS doit être uniquement réservée aux terrains simples et, en aucun cas, il ne doit être utilisé dans des zones montagneuses. Malgré ces limitations, le modèle ATLAS a été utilisé pour calculer le productible de plus de 6.000 éoliennes au Danemark avec des résultats tout à fait satisfaisants.

**MODELE, WASP-Interface** – L'utilisation de WASP (le logiciel de l'institut danois RISØ) comme « moteur de calcul » se fait via cette interface. WASP applique la méthode du Wind Atlas en utilisant un modèle évolué d'écoulement qui autorise les calculs en terrain complexe.

WASP-Interface a deux rôles qui sont le pré-traitement des données d'entrée pour les rendre interprétables par WASP et le post-traitement des résultats issus de WASP pour leur présentation et leur impression avec WindPRO sous forme de rapports détaillés permettant à l'utilisateur d'analyser les résultats.

### 3.0.0.0 Création d'une Statistique éolienne

**STATGEN** – La combinaison de METEO et de WASP-Interface permet de calculer avec WASP une *Statistique éolienne* à partir des mesures de vent. Les mesures sont « expurgées » de l'influence de la topographie pour être converties en une *Statistique éolienne*, représentative des conditions de vent de la région, qui pourra être utilisée pour réaliser des calculs de productibles ailleurs qu'au point des mesures (par exemple, aux emplacements des éoliennes d'un parc).

### 3.0.0.1 Création d'une carte de ressources éoliennes

**MODELE, RESOURCE** – La combinaison de RESOURCE et de WASP-Interface, permet, avec WASP, de calculer la carte des ressources éoliennes d'une région, même très étendue, en une seule opération. En effet, RESOURCE gère automatiquement la transition entre les différentes données de vent utilisées et l'alimentation de WASP avec des données terrain numérisées de taille compatible avec ses capacités (WASP ne peut traiter que des cartes d'étendue limitée). Enfin, des obstacles peuvent être introduits et le calcul des ressources peut être fait pour plusieurs hauteurs simultanément. Ces opérations WASP ne peut pas les réaliser automatiquement s'il est utilisé seul.

Les cartes de ressources éoliennes, sous forme de fichiers au format .rsf, calculées avec RESOURCE, sont, typiquement, utilisées par le module OPTIMISATION.



### 3.0.0.2 Calcul du productible annuel d'un parc éolien

**PARK** – Ce module est utilisé pour calculer les pertes résultant des sillages aérodynamiques des éoliennes et les productibles annuels des parcs éoliens. Les données d'entrée pour un calcul avec PARK sont le type, la position et la hauteur de moyeu des éoliennes et les données de vent issues de MODELE (ATLAS, WAsP-Interface, RESOURCE) ou de METEO ; pour utiliser PARK, au moins un de ces deux modules est requis. Le productible d'un parc en fonction de la période de l'année est calculé à partir des données de vent de contenues dans l'objet *Météo*.

### 3.0.0.3 Optimisation de la disposition d'un parc

**OPTIMISATION** – Ce module permet de déterminer la disposition, libre ou régulière, optimale des éoliennes d'un parc. Dans le cas des grands parcs à disposition régulière (typiquement en off-shore), ce module s'utilise en conjonction avec l'objet *Parc-géométrique* dont il fait varier les paramètres définissant la géométrie du parc (depuis la version 2.4) afin de déterminer la disposition optimale.

Dans le cas de terrains complexes l'optimisation se fait à partir d'autres paramètres (voir section 8 OPTIMISATION).

Le module OPTIMISATION utilise les modules PARK et MODELE (RESOURCE) et ne peut fonctionner sans ces deux modules.

---

## 3.0.1 Guide des étapes à suivre pour calculer un productible annuel

### 3.0.1.0 Calcul à partir des mesures locales, sans modèle.

- Disposez sur la carte du projet les éoliennes (voir section 2, BASIS).
- Créez un objet *Météo*.
- Importez les mesures de vent dans l'objet *Météo*. Les 4 formats suivants sont acceptés :
  - 1) Données brutes issues des fichiers d'une station d'acquisition,
  - 2) Séries temporelles (achetées à Météo France par ex.),
  - 3) Tableau des fréquences des vitesses par directions ou fichiers .TAB (tableaux WAsP),
  - 4) Paramètres de Weibull (k, A ou Vmoy du vent) par secteur (ou seulement la Vmoy pour des calculs préliminaires).
- Lancez le calcul PARK (dans le cas d'un parc éolien) ou le calcul METEO (dans le cas d'une éolienne isolée pour tester différents types de machine et hauteurs de moyeu).  
Remarque : pour des résultats réalistes, les mesures doivent être corrigées afin d'être représentatives des conditions sur le long terme. Si les mesures n'ont pas été faites à la hauteur des moyeux, il faut connaître le gradient vertical du vent pour faire les extrapolations. Si les emplacements des éoliennes se trouvent à plus de 50m du lieu des mesures, cette méthode n'est pas utilisable, sauf si le terrain est plat, sans obstacles et sans changements de rugosité, autrement voir 3.0.1.4.

### 3.0.1.1 Calcul à partir de statistiques éoliennes, avec le modèle ATLAS

- Disposez sur la carte du projet les éoliennes (voir section 2, BASIS).
- Créez un objet *Données-site* avec pour usage *Calcul de productibles avec ATLAS* et choisissez les *Statistiques éoliennes* à utiliser (s'il n'y a pas de statistiques disponibles, vous pouvez les créer, voir 3.0.1.3).
- Entrez les rugosités (dans un rayon de 20 km autour de l'objet *Données-site*), les obstacles et les collines du voisinage. Ces entrées se font en mode graphique en utilisant les options du menu contextuel qui apparaît en cliquant avec le bouton droit de la souris sur l'objet *Données-site*.
- Lancez le calcul PARK (dans le cas d'un parc éolien) ou ATLAS (dans le cas d'une éolienne isolée pour tester différents types de machine et hauteurs de moyeu).

### 3.0.1.2 Calcul à partir de statistiques éoliennes, avec le modèle WAsP

- Disposez sur la carte du projet les éoliennes (voir section 2, BASIS).
- Entrez les courbes de niveau dans un rayon d'environ 5 km autour du site en utilisant un objet *Données-lignes*.
- Entrez les rugosités dans un rayon d'environ 20 km autour du site. Trois méthodes sont possibles :
  - 1) Entrée des rugosités en utilisant la rose de l'objet *Données-site*,
  - 2) Entrée des rugosités sous forme de lignes à l'aide d'un l'objet *Données-lignes*,
  - 3) Entrée/importation des rugosités sous forme de polygones à l'aide d'un objet *Données-surfaces*.
- Entrez les obstacles en utilisant des objets *Obstacle*.
- Créez un objet *Données-site* avec pour usage *Calcul de productibles avec WAsP* et choisissez les *Statistiques éoliennes* à utiliser (s'il n'y a pas de statistiques disponibles, vous pouvez les créer, voir 3.0.1.3). REMARQUE : la qualité des résultats dépend beaucoup de la pertinence des *Statistiques éoliennes* utilisées. Vérifiez également, dans cet objet, que les *Etendues des données* de rugosité et d'altitude sont suffisantes.
- Lancez le calcul PARK (dans le cas d'un parc éolien) ou WAsP-Interface (dans le cas d'une éolienne isolée pour tester différents types de machine et hauteurs de moyeu ou pour l'examen des gradients du vent).

### 3.0.1.3 Calcul d'une Statistique éolienne (requiert WAsP)

- Créez un objet *Météo* à l'emplacement du mât de mesure, voir 3.0.1.0.
- Entrez les courbes de niveau dans un rayon d'environ 5 km autour du mât de mesure en utilisant un objet *Données-lignes*.
- Entrez les rugosités dans un rayon d'environ 20 km autour du mât de mesure. Trois méthodes sont possibles :
  - 1) Entrée des rugosités en utilisant la rose de l'objet *Données-site*,
  - 2) Entrée des rugosités sous forme de lignes à l'aide d'un l'objet *Données-lignes*,
  - 3) Entrée/importation des rugosités sous forme de polygones à l'aide d'un objet *Données-surfaces*.
- Entrez les obstacles en utilisant des objets *Obstacle*.
- Créez un objet *Données-site* avec pour usage *Calcul de statistiques éoliennes avec STATGEN*.
- Lancez le calcul STATGEN (qui ira chercher les données dans les objets *Météo* et *Données-site*) pour créer la *Statistique éolienne*.
- Utilisez la *Statistique éolienne* ainsi créée, voir 3.0.1.1 et 3.0.1.2.

### 3.0.1.4 Calcul d'une carte des ressources éoliennes (requiert WAsP)

- Entrez les courbes de niveau dans un rayon incluant l'étendue de la carte des ressources à calculer plus 5 km, en utilisant un objet *Données-lignes*.
- Entrez les rugosités dans un rayon incluant l'étendue de la carte des ressources à calculer plus 20 km. Deux méthodes sont possibles :
  - 1) Entrée des rugosités sous forme de lignes à l'aide d'un objet *Données-lignes*.
  - 2) Entrée/importation des rugosités sous forme de polygones à l'aide d'un objet *Données-surfaces* et conversion en lignes de rugosité. Les polygones peuvent être importés à partir de fichiers .dxf par exemple.
- Créez un objet *Données-site* avec pour usage *Calcul de cartes de ressources éoliennes avec RESSOURCE* et choisissez les *Statistiques éoliennes* à utiliser (s'il n'y a pas de statistiques disponibles, vous pouvez les créer, voir 3.0.1.3). Dans cet objet vérifiez que les *Etendues des données* de rugosité et d'altitude sont suffisantes. Délimitez l'étendue de la carte à calculer
- Lancez le calcul RESSOURCE, indiquez la résolution de la carte et les différentes hauteurs auxquelles les ressources devront être calculées.
- Créez un objet *Calque-résultat* pour visualiser les ressources à l'écran et faire une optimisation manuelle de l'implantation des éoliennes (elle peut être faite automatiquement avec le module OPTIMISATION).

## 3.1 Notions fondamentales

### 3.1.0 Données nécessaires pour calculer un productible

Pour estimer le productible annuel d'une éolienne, il faut connaître:

- 1) La distribution annuelle des vitesses du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne,
- 2) La courbe de puissance de l'éolienne, corrigée en fonction de la densité de l'air et, éventuellement, en fonction de la turbulence et du cisaillement.

Dans le cas d'éoliennes se trouvant à proximité les unes des autres ou d'un parc éolien, il faut aussi connaître :

- la distribution des vitesses du vent par secteur,
- les positions exactes des éoliennes et leur courbe de  $C_t$ .

### 3.1.1 Distribution annuelle des vitesses du vent

La distribution annuelle des vitesses du vent, donne la probabilité d'occurrence d'une classe de vitesse du vent sur une période d'une année. La distribution de Weibull, qui se définit par deux paramètres, est souvent utilisée pour décrire la distribution des vitesses du vent en remplacement des histogrammes par classe de vent.

La Figure 1 présente des exemples d'histogrammes des vitesses et leur description par une distribution de Weibull (Source: Atlas Eolien Européen, RISØ, 1989)

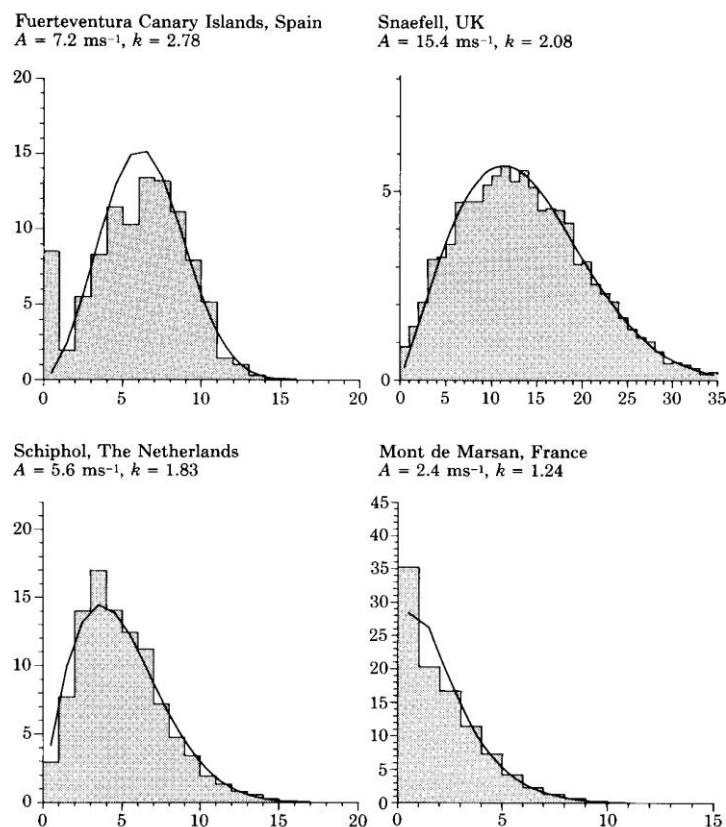


Figure 1

Définition de la distribution de Weibull :

$$F(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k}$$

où :

$u$  = vitesse du vent,

$k$  = paramètre de forme

$A$  = paramètre d'échelle ( $A$  est proche de la moyenne, par ex.  $A = 1,126 \times u_{\text{moy}}$  pour  $k = 2$ )

La variante de Weibull avec  $k=2$  est la distribution de Raleigh qui est souvent utilisée pour caractériser la distribution des vitesses du vent quand on connaît seulement sa vitesse moyenne.

### 3.1.1.0 Méthodes pour établir la distribution des vitesses du vent

La distribution des vitesses du vent peut être établie à partir de plusieurs méthodes:

**A)** : En mesurant le vent à l'emplacement des éoliennes.

**B)** : A partir d'une ou plusieurs *Statistiques éoliennes* régionales et de la description du terrain autour du site en utilisant la méthode du Wind Atlas avec ATLAS si le terrain est simple (ou WASP).

**C)** : A partir d'une ou plusieurs *Statistiques éoliennes* régionales et de la description du terrain autour du site en utilisant la méthode du Wind Atlas avec WASP si terrain est complexe.

**D)** : En calculant, à partir de mesures de vent faites dans la région (ou sur le site où les éoliennes seront installées), la/les *Statistiques éoliennes* régionales avec le module STATGEN et WASP, puis en utilisant la/les *Statistiques éoliennes* ainsi obtenues de la manière indiquée en C).

Il est essentiel que les distributions des vitesses du vent utilisées soient représentatives du long terme. Si au départ on dispose de mesures faites sur courte période, le module MCP permet de les corriger.

La connaissance précise de la distribution des vitesses du vent est déterminante, car la puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse. La puissance instantanée en sortie d'une éolienne est donnée par la formule suivante:

$$P = \frac{1}{2} \rho u^3 A C_e(u) \quad (\text{Watt})$$

où :

$\rho$  = densité d'air

$u$  = vitesse du vent

$A$  = surface balayée par le rotor.

$C_e(u)$  = rendement de l'éolienne en fonction de la vitesse  $u$  du vent

Exemple:

Vitesse du vent = 10 m/s, densité de l'air = 1,125 kg/m<sup>3</sup>, diamètre de rotor éolienne = 23 m, rendement éolienne = 40% à 10m/s, on a alors :

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,125 \text{ kg/m}^3 \cdot 10^3 \text{ (m/s)}^3 \cdot 23^2 \cdot \pi/4 \text{ m}^2 \cdot 0,40 = 93482 \text{ W}$$

Soit une puissance de 93,4 kW et une production d'énergie de 93,4 kWh en une heure.

Pour une vitesse du vent de 5 m/s, soit 50% de la valeur précédente, et pour un rendement identique (dans la réalité le rendement serait plus faible) la puissance tombe à 11,7 kW soit 12,5% de la puissance précédente.

Remarque: cette formule ne permet de calculer le productible. Pour calculer le productible annuel, il faut connaître la distribution des vitesses du vent et la courbe de puissance de l'éolienne.



### Méthode A) Mesure du vent sur site

Pour être représentatives du long terme, les mesures devraient être effectuées sur une période minimum de 3 ans. Quand les mesures sont faites sur des périodes plus courtes, elles doivent être corrigées à partir de données à long terme provenant de sites voisins présentant une bonne corrélation.

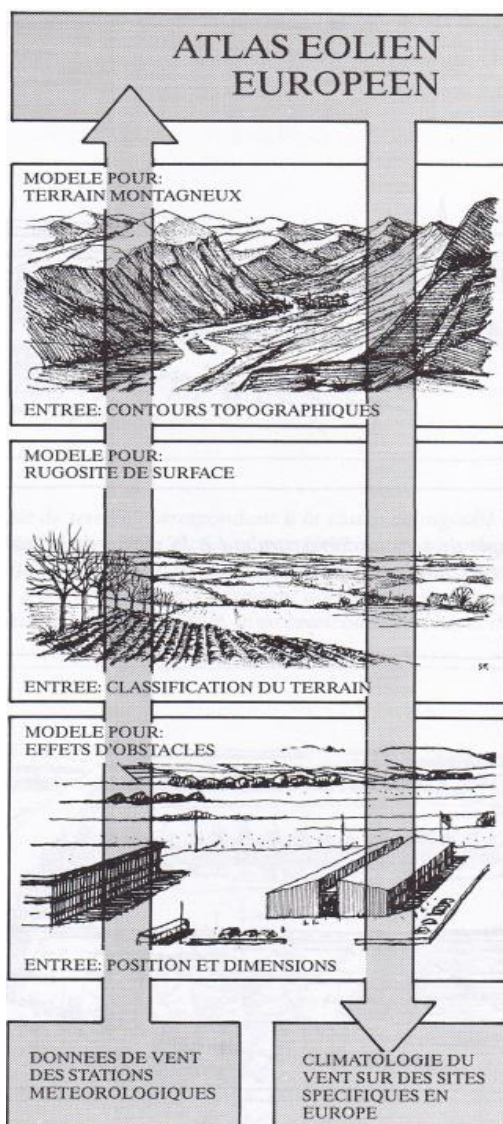
Les données doivent être disponibles dans l'un des formats suivants:

- Vitesses et directions du vent horodatées sous forme de séries temporelles, issues d'une station de mesure par exemple.
- Tableaux/histogrammes des vitesses du vent par classe et par secteur si possible.
- Paramètres de Weibull, si possible, par secteur et avec leur fréquence par secteur.
- Vitesses moyenne du vent si possible, par secteur et avec leur fréquence par secteur.

Les données sous ces formats peuvent être importées ou entrées manuellement dans un objet *Météo* de WindPRO (voir 3.2.2 et 3.3.2).

### Méthode B) Statistiques éoliennes régionales + description du site (en terrain simple)

La distribution des vitesses du vent, si le terrain est simple, peut être calculée avec ATLAS (comme c'est le cas dans la plupart des régions du Danemark). Le calcul avec ATLAS nécessite un objet *Données-site* et une ou plusieurs *Statistiques éoliennes* issues de mesures réalisées dans un rayon maximal de 200km autour du site (voir 3.2.1 et 3.3.1).



### Méthode C) Statistiques éoliennes régionales + description du site (en terrain complexe)

La distribution des vitesses du vent en terrain complexe (très vallonné, montagneux ou comportant de nombreux obstacles) peut être calculée en utilisant WindPRO en combinaison avec le logiciel WAsP (qui doit être acheté séparément auprès de RISØ). WindPRO utilise WAsP de manière invisible pour l'utilisateur. Le calcul avec WAsP nécessite un objet *Données-site* et une ou plusieurs *Statistiques éoliennes* issues de mesures réalisées dans un rayon maximum 100 km autour du site, cette distance pouvant se réduire à quelques centaines de mètres en terrain montagneux (voir 3.2.1 et 3.3.1).

### Méthode D) Transformation avec WAsP des mesures faites dans la région en statistiques éoliennes régionales

Les remarques concernant le long terme, faites en A), restent valables.

A la différence de la méthode A, les mesures ne s'utilisent pas directement. Ici, les mesures sont transformées en *Statistiques éoliennes* régionales en introduisant la description du terrain.

En pratique, il faut d'abord créer à l'emplacement des mesures un objet *Météo* contenant les mesures et un objet *Données-site* décrivant le terrain à partir desquels sera créée la *Statistique éolienne*. Une fois la *Statistique éolienne* créée, elle peut être utilisée de la manière décrite dans les méthodes B) et C) (voir aussi 3.2.1)

La Figure 2, extraite de l'Atlas Eolien Européen Atlas Eolien Européen, illustre la méthode du même nom, qui à partir de mesures de vent locales permet de calculer une *Statistique éolienne* régionale (en expurgant les mesures des effets de la topographie).

A partir de la *Statistique éolienne* régionale on calcule les conditions de vent en introduisant les effets de la topographie du site étudiée. Cette méthode est mise en œuvre par le logiciel WAsP.

Figure 2



### 3.1.2 Fitting Weibull Parameters for Wind Energy Applications

A number of different methods exist for estimating the distribution parameters in an arbitrary distribution. Among the most common methods are procedures using: 1) estimation of the statistical moments, 2) least squares methods, 3) maximum likelihood methods or 4) Bayesian methods. An introduction to these methods may be found in Ross. Traditionally, it is recommended to use the maximum likelihood method for estimating the distribution parameters because of the ability of this method to estimate not only the parameters themselves but also a consistent estimate of any statistical uncertainty connected to the distribution parameters. When using the methods 1) or 2), it is possible to include uncertainty estimates on the distribution parameters using Bootstrap or Jackknife methods, see Efron and Tibshirani.

#### 3.1.2.0 The Weibull Distribution

For wind energy applications, the two-parameter Weibull distribution is used as the most common parametric distribution of the  $T$ -minutes averaged wind speed (often  $T=10$  minutes):

$$F(u) = 1 - \exp\left[-\left[\frac{u}{A}\right]^k\right] \quad (1)$$

$$f(u) = F'(u) = \frac{k}{A} \cdot \left[\frac{u}{A}\right]^{k-1} \exp\left[-\left[\frac{u}{A}\right]^k\right] \quad (2)$$

where  $k$  is the Weibull form parameter  
 $A$  is the Weibull scale parameter  
 $f(u)$  is the Weibull density function  
 $F(u)$  is the Weibull cumulative distribution function

The statistical moments,  $a_v$ , are related to the Weibull distribution parameters as follows:

$$\text{Mean value:} \quad \mu = a_1 = A \cdot \Gamma[1 + 1/k] \quad (3)$$

$$v\text{-th order statistical moment:} \quad a_v = \int f(u)u^v du = A^v \cdot \Gamma[1 + v/k] \quad (4)$$

#### 3.1.2.1 Estimating Moments in the Sample (Measured/Observed) Distribution

In the sample distribution, the statistical  $v$ -th order moments,  $a_v$ , are given by:

$$a_v = \frac{1}{n} \sum_i x_i^v \quad (5)$$

where  $a_v$  is the  $v$ -th order statistical moment  
 $n$  is the number of samples  
 $x_i$  is the sample with the index  $i$

Note: The sample moments should be determined directly from the available time series/samples. However, it is also possible to estimate the sample moments from histograms – even if this procedure is slightly more inaccurate.

#### 3.1.2.2 The Wind Power Density

The available wind power density is proportional to the mean cube of the wind speed. This may be expressed using the Weibull parameters:

$$\begin{aligned} E &= \int 0.5(\rho u)u^2 f(u)du = 0.5\rho a_3 \\ &= 0.5\rho A^3 \cdot \Gamma(1 + 3/k) \end{aligned} \quad (6)$$

When dealing with the sample distribution, the wind power density is:

$$E_{sample} = 0.5\rho \frac{1}{n} \sum_i u_i^3 \quad (7)$$

### 3.1.2.3 Estimating the Weibull Parameters for Wind Energy Applications

This section describes how to estimate the Weibull parameters using the method described in The European Wind Atlas. When using the 2-parameter Weibull distribution for wind energy applications, the requirements for the estimated 'optimum' distribution parameters may not be as specified in the four methods above. Indeed, The European Wind Atlas specifies two criteria quite different from the ones specified in the 'traditional' methods:

- The total wind energy in the fitted Weibull distribution and the observed distribution are equal.
- The frequency of occurrence of the wind speeds higher than the observed average speeds are the same for the two distributions.

These two requirements lead to an equation in  $k$  only. It is important to notice, that the average wind speed in the requirement in 2) is the sample wind speed. This leads to the required equation in  $k$  only. The equations (6) + (7) is used in order to determine the  $A$  parameter as a function of  $k$ :

$$E = E_{sample} \Leftrightarrow A = \left[ \left( \frac{1}{n} \sum_i u_i^3 \right) / \Gamma(1 + 3/k) \right]^{1/3} = [a_3 / \Gamma(1 + 3/k)]^{1/3} \quad (8)$$

Now, the requirement 2) is used with equation (8):

$$P[u > \mu_{sample}] = 1 - F(\mu_{sample}) = \exp \left[ - \left( \frac{\mu_{sample}}{A} \right)^k \right] \\ = \exp \left[ - \left( \frac{\mu_{sample}}{[a_3 / \Gamma(1 + 3/k)]^{1/3}} \right)^k \right] \quad (9)$$

A standard root finding algorithm is utilized in order to determine  $k$  from eq. (9), as the probability of exceeding the mean value,  $P[u > \mu_{sample}]$  is calculated directly from the sample distribution (time series or histograms). Now, when  $k$  is known (calculated from (9)),  $A$  is easily determined from (8), assuming that  $E$  or  $a_3$  are also determined from the sample distribution.

#### Example – samples with histograms and time series data

Using time series data in a section between degrees = [255;285] from a Danish wind farm at Torrild, then the first and third order moments may be calculated to  $a_0 = 5.593$  m/s and  $a_3 = 321.88$  (m/s)<sup>3</sup> (using eq. 5). The probability of exceeding the mean wind speed is 0.45421 in the sample distribution. The  $k$  parameter may be determined to  $k = 2.0444$  and  $A = 6.2801$  m/s using equations (9) and (8).

Estimating the moments from a histogram using a 1 m/s bin width yields  $a_0 = 5.654$  m/s and  $a_3 = 332.15$  (m/s)<sup>3</sup> and the probability of exceeding the mean is 0.4511. The Weibull parameters can be determined to  $k = 2.0267$  and  $A = 6.3275$ , i.e. a slightly different result than the one obtained using time series. The current implementation in WindPRO differs slightly from the specifications stated in the European Wind Atlas (using the distribution density function instead of the distribution function), but it also uses histograms in estimating the Weibull parameters. Here, an  $A = 6.316$  and  $k = 2.0340$  is found. WAsP reports  $A = 6.3$  and  $k = 2.04$ . The histogram values that were used are stated below:

Wind [m/s]	<1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Count [o/oo]	11	62	121	155	122	120	97	84	77	73	41	22	8	4	2	1	1	0	0	0

Please note that when calculating the mean value from the Weibull  $A$  and  $k$  parameters (see eq. (3)), then the mean value is slightly different from the one found directly from the sample values. This is due to the fact, that the fitting criterion assures only that the energy in the sample and fitted distributions are equal, and furthermore that the probability of exceeding the sample mean are the same. The means calculated from the Weibull  $A$  and  $k$  parameters are 5.564 m/s for the time series data and 5.606 m/s for the histogram data.

### 3.1.3 Courbe de puissance et courbe de Ct

La courbe de puissance donne la puissance délivrée par une éolienne en fonction de la vitesse du vent à hauteur de moyeu. La courbe de puissance peut être soit mesurée, en relevant la puissance délivrée par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent, soit calculée en utilisant des logiciel d'aérodynamique.

Un très grand nombre d'éoliennes, avec leurs courbes de puissance, sont disponibles dans la *Bibliothèque d'éoliennes* hébergée dans le module BASIS de WindPRO, voir section-2 BASIS. Qu'elles soient mesurées ou calculées, la confiance que l'on peut accorder aux courbes de puissance est variable. Il est donc important de contrôler les courbes de puissance, voir 3.5.2 Vérification des courbes de puissance.

Les courbes de  $C_t$ , qui sont utilisées pour les calculs avec PARK peuvent de simples courbes standard fonction du type de régulation de puissance stall ou pitch, mais il est préférable d'utiliser des courbes plus précises étant donné qu'elles interviennent dans le calcul des pertes. Normalement les grandes éoliennes modernes sont fournies avec leur courbe propre de  $C_t$ .

La Figure 3 présente les courbes de puissance, de  $C_e$  et de  $C_t$  typiques d'une éolienne moderne.

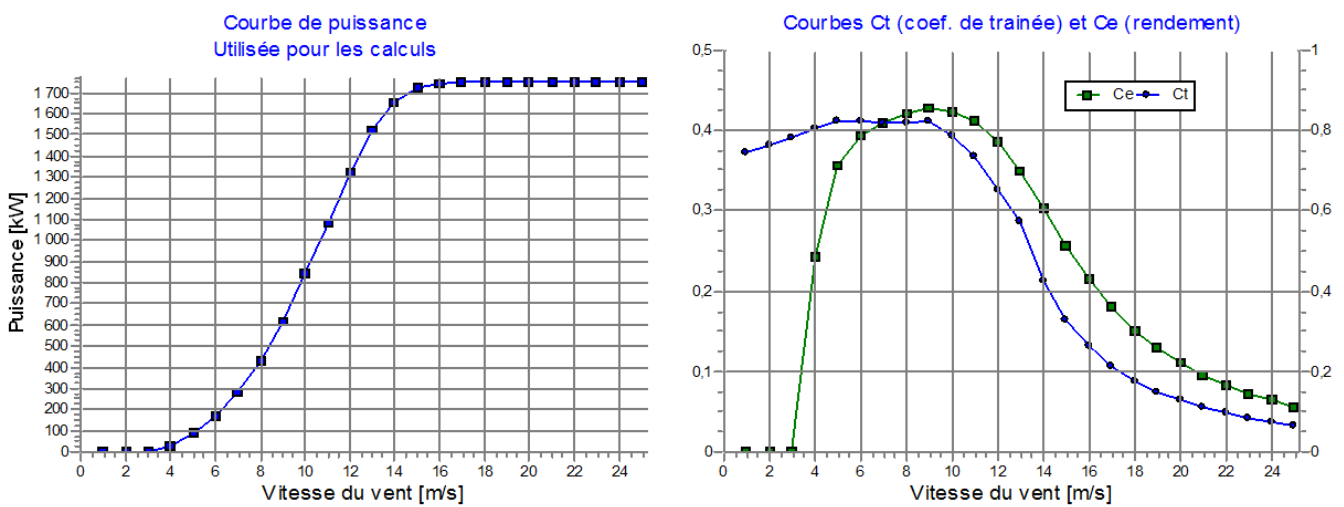


Figure 3

## 3.2 Calculs et modèles

### 3.2.0 Introduction

Dans ce chapitre, vous trouverez une brève description des calculs proposées par WindPRO et des modèles utilisés. La suite de ce chapitre décrit :

- La méthode du Wind Atlas (module MODELE : ATLAS, WAsP-Interface et RESSOURCE),
- L'utilisation directe des mesures ou de leur distribution de Weibull (module METEO),
- L'utilisation du module PARK en conjonction avec les deux modules précédemment mentionnés.
- Les différences entre les modèles WAsP 10 et postérieurs et les versions antérieures.

### 3.2.1 Méthode du Wind Atlas (ATLAS, WAsP-Interface et RESSOURCE)

Les calculs exposés à la suite se fondent tous sur la méthode du Wind Atlas.

Pour utiliser la méthode du Wind Atlas, il est nécessaire de disposer d'une ou plusieurs *Statistiques éoliennes* régionales qui, associées à une description du terrain autour du site étudié sur un rayon d'environ 20 km, permettent d'établir les caractéristiques du vent à la hauteur voulue. Le productible d'une éolienne se calcule, ensuite, à partir de sa courbe de puissance et des caractéristiques du vent calculées à sa hauteur de moyeu.

Donc, les 3 informations nécessaires pour un calcul de productible avec la méthode du Wind Atlas sont:

- Une ou plusieurs *Statistiques éoliennes* caractérisant la climatologie du vent dans la région,
- La description du terrain (rugosité, courbes de niveau et obstacles),
- Les courbes de puissance des éoliennes.

#### 3.2.1.0 Comparaison d'ATLAS et de WAsP

Le calcul avec ATLAS met en œuvre le modèle décrit dans l'Atlas Eolien Européen avec les limitations suivantes:

- Un seul obstacle par secteur. De plus, la modélisation de l'obstacle est beaucoup moins élaborée que celle de WAsP.
- L'influence du relief ne se calcule pas à partir d'un modèle d'écoulement utilisant des courbes de niveau, comme avec WAsP. Avec ATLAS on peut décrire une seule colline dont on indique la hauteur et la distance du sommet par rapport au pied de la colline dans chaque secteur. L'influence de la colline est calculée par une simple formule mathématique utilisant ses hauteurs et ses longueurs dans les différents secteurs.
- Le modèle de stabilité atmosphérique, décrit dans l'Atlas Eolien Européen, qui modifie le profil vertical du vent dans les zones côtières (0-10 km), n'est pas implémenté dans ATLAS. D'après les analyses de sensibilité effectuées par EMD son absence ne produit que des erreurs insignifiantes quand les éoliennes ne dépassent pas 50m de hauteur de moyeu.

Dans la mise en œuvre de la méthode du Wind Atlas, la description du terrain est essentielle. Elle doit comporter les éléments suivants:

- La description détaillée de la rugosité du terrain dans un rayon de 5 km autour du site; une description plus grossière est suffisante entre 5 km et 20 km,
- La description des collines (ATLAS) ou des courbes de niveau (WAsP) dans rayon d'environ 5 km autour du site,
- La description des obstacles se trouvant dans un rayon d'environ 1000 m autour de chaque éolienne.

Ces rayons sont donnés pour des hauteurs de moyeu de l'ordre de 50m. Pour des hauteurs supérieures ces rayons doivent être augmentés et peuvent être diminués pour des hauteurs inférieures.

Habituellement, une bonne description du terrain demande, en plus d'un bon matériel cartographique, une visite du site.

### 3.2.1.1 Statistiques éoliennes régionales

Les *Statistiques éoliennes* caractérisant la climatologie régionale du vent des pays de la communauté européenne (en 1989) ont été consignées par l'institut danois RISØ dans l'Atlas Eolien Européen. Certains pays ayant rejoint la communauté européenne ultérieurement, comme la Suède et la Finlande ont réalisé des atlas similaires. Quand plusieurs atlas sont disponibles, il est difficile de recommander un atlas plutôt qu'un autre (au Danemark, l'atlas éolien DANMARK '07 est généralement utilisé). En général, on peut se fixer comme règle de choisir l'atlas proposant la *Statistique éolienne* calculée à partir du lieu de mesure qui se trouve le plus près du site étudié et puis de contrôler les résultats en les comparant avec ceux obtenus à partir de statistiques voisines.

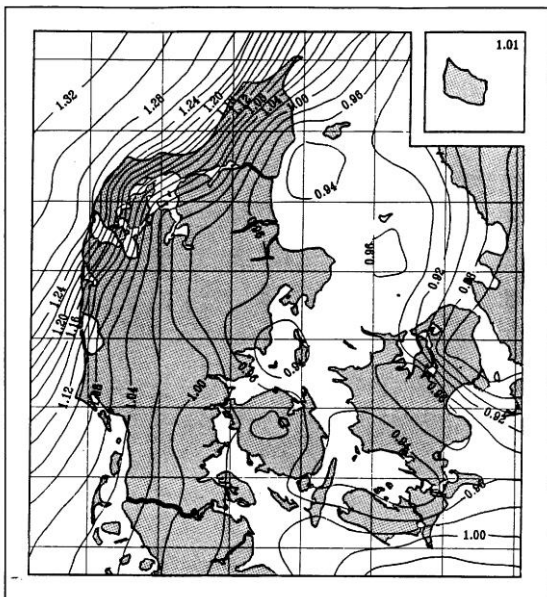
Une autre approche est d'utiliser simultanément plusieurs atlas et de pondérer les *Statistiques éoliennes* qu'ils proposent inversement à leur distance par rapport au site.

Les statistiques éoliennes régionales de l'Atlas Eolien Européen, qui décrivent les caractéristiques du vent d'une région, se présentent sous forme de tableaux contenant les données formatées conformément au paramétrage par défaut de WAsP à savoir les paramètres Weibull A et k :

- par classe de rugosité : 0, 1, 2 et 3 (4 en tout),
- pour les hauteurs : 10m, 25m, 50m, 100m et 200m (5 en tout),
- par secteur: N, NNE, ENE, ..., NNO (12 en tout),

ce qui donne  $4 \times 5 \times 12 = 240$  distributions de la vitesse du vent.

La difficulté réside dans l'appréciation de la qualité des atlas éoliens qui peut varier considérablement. Des statistiques éoliennes de mauvaise qualité peuvent facilement générer une erreur de 50% sur la valeur du productible. C'est pourquoi il est essentiel de vérifier les résultats en les comparant avec ceux obtenus à partir d'autres atlas ou, mieux encore, en calculant les productibles d'éoliennes en fonctionnement depuis plusieurs années, si possible, et en les comparant avec les productions réelles.



#### Recommandations pour les calculs au Danemark

Pour les calculs au Danemark, l'utilisation de l'atlas DANMARK "07" est recommandé. Il contient des courbes qui permettent d'ajuster la vitesse du vent en fonction du lieu géographique (corrections des différences des caractéristiques du vent géostrophique env. 1000m au dessus du sol du Danemark) qui se fondent sur une étude approfondie de la production de nombreuses éoliennes du Danemark.

La Figure 4 présente la carte (EMD/InterCon I/S) indiquant les facteurs de corrections à appliquer aux productibles calculés à partir de l'atlas DANMARK "07" (basé sur la statistique éolienne de "Beldringe" incluse dans l'Atlas Eolien Européen). Consultez le lien <http://help.emd.dk/WindPRO> pour plus d'informations.

Figure 4

#### Recommandations pour les calculs hors du Danemark

En général, les statistiques éoliennes consignées dans l'Atlas Eolien Européen semblent fiables.

Quand d'autres sources sont utilisées, il est recommandé de comparer au moins deux *Statistiques éoliennes* de la région et de vérifier que les différences sont acceptables ou si, c'est possible, de calculer le productible d'éoliennes existantes et de les comparer aux productions réelles.

#### Utilisation de plusieurs statistiques éoliennes

WindPRO peut utiliser plusieurs *Statistiques éoliennes* simultanément. Le programme calcule automatiquement les facteurs de pondération à appliquer en donnant aux *Statistiques éoliennes* un poids inversement proportionnel à leur distance par rapport au site étudié.

Ces pondérations peuvent être ajustées, si nécessaire, manuellement. Ainsi, dans le cas d'un site situé près de la côte, il convient, en général, de modifier la pondération automatique afin d'affecter un poids plus important aux *Statistiques éoliennes* se trouvant sur la côte qu'à celles se trouvant à l'intérieur des terres même si ces dernières sont plus près du site étudié.



L'utilisation de plusieurs *Statistiques éoliennes* dans un calcul peut réduire le niveau d'incertitude (voir 3.5 pour plus d'informations sur le contrôle de la qualité des données).

A l'exception du Danemark et de l'Allemagne où le grand nombre d'éoliennes installées permet d'avoir une connaissance précise des conditions de vent, il est, dans la plupart des cas, recommandé d'installer un mât de mesure pour les projets de taille importante (> 5 MW),

### 3.2.1.2 Description de la rugosité

La rugosité peut être décrite de trois manières différentes :

**A)** : Par une rose des rugosités en utilisant l'objet *Données-site* : la description des changements de rugosités se fait par secteur.

**B)** : Par des lignes de rugosité en utilisant un objet *Données-lignes*.

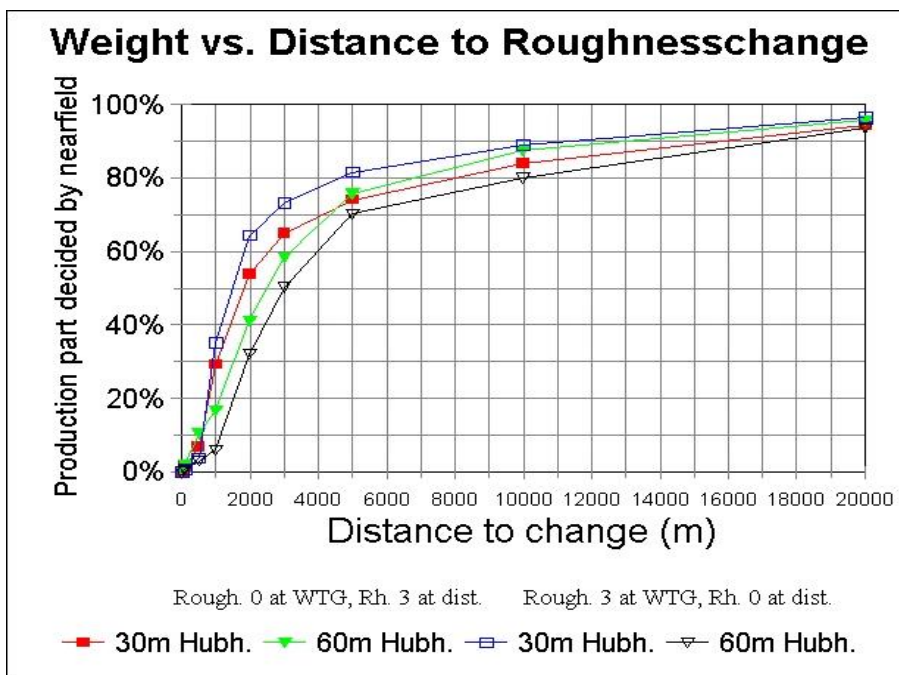
**C)** : En délimitant les différentes rugosités du terrain par des polygones à l'aide d'un objet *Données-surfaces*. Les polygones peuvent être importés dans l'objet *Données-surfaces* à partir d'autres applications (par ex. fichiers au format Shape générés par un SIG). Les polygones peuvent être convertis en lignes de rugosité si nécessaire.

Quelle que soit la méthode utilisée, WindPRO essaye de rendre le plus aisé possible l'entrée des données de rugosité. Les méthodes B) et C) font appel, respectivement à des objets *Données-lignes* et *Données-surfaces*, pour plus d'information sur l'utilisation de ces objets reportez-vous à la section 2, BASIS.

Dans la méthode A), le terrain est divisé en 8 secteurs, 12 secteurs, ou plus. Le nombre de secteurs doit être le même que celui de la *Statistique éolienne* utilisée. En général les *Statistiques éoliennes* utilisent 12 secteurs de 30 degrés centrés sur:

- 0 degré (de 345 degrés - 15 degrés) (N)
- 30 degrés (de 15 degrés - 45 degrés) (NNE)
- 60 degrés (de 45 degrés - 75 degrés) (ENE)
- 90 degrés (de 75 degrés - 105 degrés) (EST)
- etc.

La rugosité du terrain doit être décrite, par secteur, dans un rayon d'au moins 20 km autour du site. Suivant les hauteurs de moyeu et le type de terrain, un rayon plus important peut être nécessaire. Quel que soit le rayon utilisé, il est recommandé de choisir le même pour tous les secteurs. Jusqu'à 10 changements de rugosité par secteur sont acceptés.



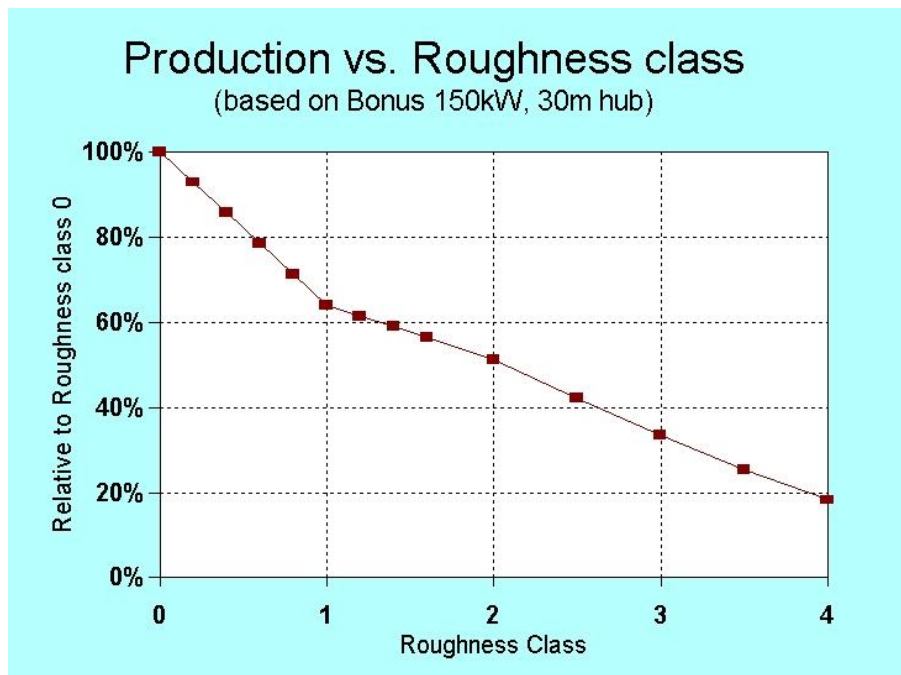
La Figure 5 illustre l'influence, sur le productible, des changements de rugosité en fonction de leur distance par rapport à l'éolienne.

Par exemple, pour une rugosité de classe 3 autour de l'éolienne et une rugosité de classe 0 au-delà d'une distance de 3000 m, 72% de la production est déterminée par la rugosité autour de l'éolienne si son moyeu est à 30 m de hauteur et seulement 50% si son moyeu est à 60 m de hauteur.

Figure 5

La rugosité peut être entrée en utilisant les classes ou les longueurs de rugosité. La correspondance est donnée dans le tableau suivant :

Classe de rugosité	Longueur de rugosité	Energie relative %	Description
0	0,0002	100	Surfaces couvertes d'eau.
0,5	0,0024	73	Terrains mixtes eau et terre ou terrains très lisses.
1	0,03	52	Terres agricoles ouvertes, sans haies, avec constructions isolés et collines douces.
1,5	0,055	45	Terres agricoles barrées de haies de 8 m de hauteur écartées de 1250 m avec constructions dispersées
2	0,1	39	Terres agricoles barrées de haies de 8 m de hauteur écartées de 800 m avec constructions dispersées
2,5	0,2	31	Terres agricoles fermés avec une végétation dense barrées de haies de 8 m de hauteur écartées de 250 m.
3	0,4	24	Villages, petites villes, terres agricoles fermées et barrées de haies nombreuses ou hautes, forêts et terrains très accidentés.
3,5	0,8	18	Grandes villes, urbanisations avec grandes zones construites.
4	1,6	13	Grandes urbanisations construites en hauteur.



La rugosité des terrains barrés par de nombreuses haies est difficile à estimer. Vous pouvez utiliser l'abaque de Figure 6 à cet effet.

On peut remarquer que la relation entre la rugosité et la hauteur des haies n'est pas linéaire.

L'abaque est basée sur les hypothèses suivantes : les haies barrent des terres agricoles ouvertes de rugosité de classe 1 (cela est pris en compte par l'ajout de 0,03m aux valeurs de rugosité) et la porosité des haies est de 0,33.

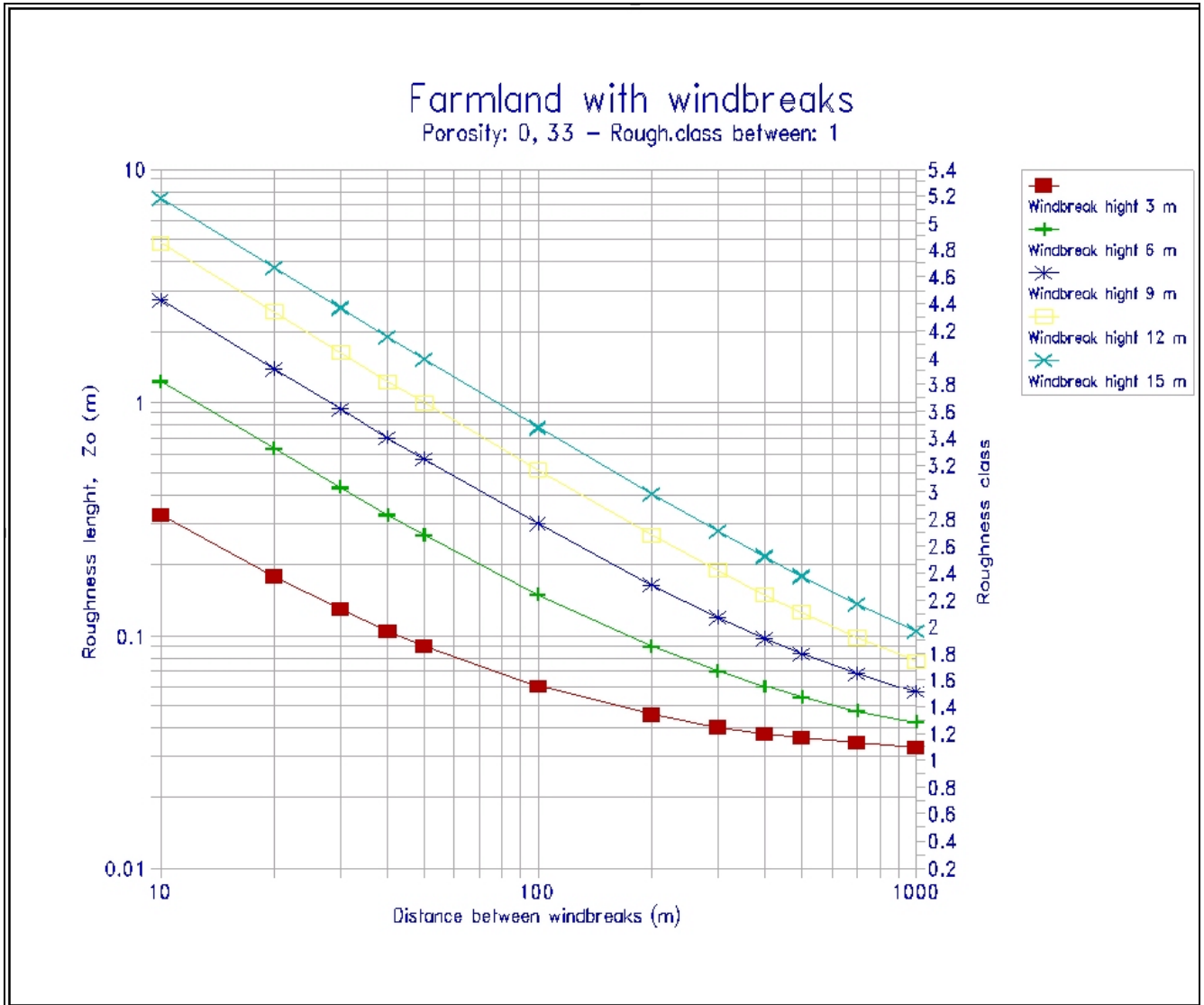


Figure 6

Pour les zones construites, la rugosité peut s'estimer à l'aide de la formule suivante:

$$z_0 = 0,5 * h^2 * b * n / A \quad \text{en [m]}$$

où :

**h** : hauteur des constructions en [m]

**b** : largeur des constructions en [m]

**n** : nombre de constructions

**A** : aire de la surface couverte par les n construction [m<sup>2</sup>]

Remarque: la valeur de la rugosité du terrain entre les constructions doit être ajoutée au résultat obtenu avec la formule ci-dessus. Par exemple, si les édifices sont séparés par des terres agricoles ouvertes ajoutez 0,03 m au résultat de la formule.

Le graphique de la Figure 7 suivante donne la relation entre classes et longueurs de rugosité.

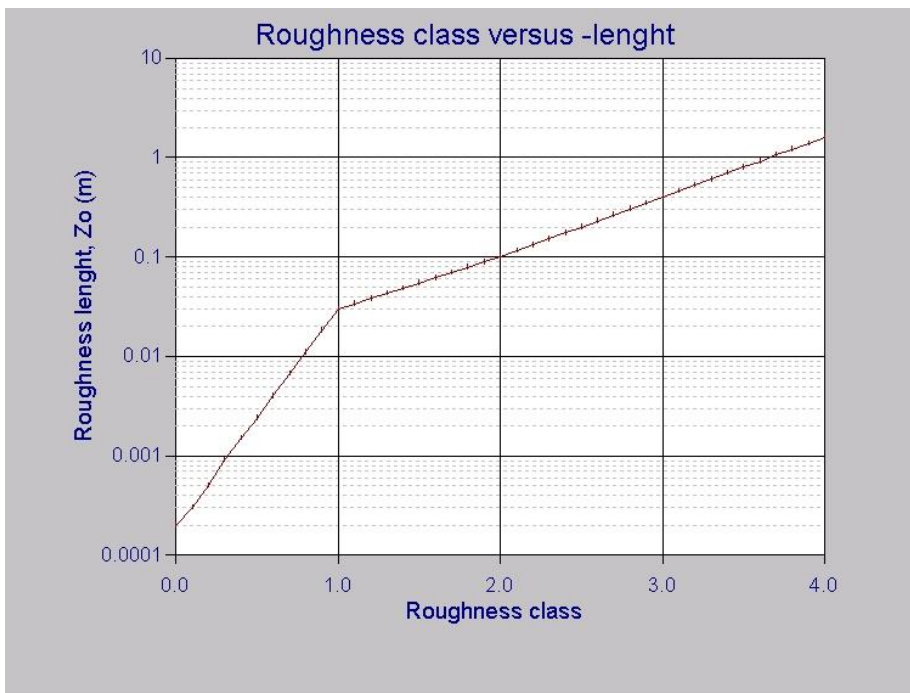


Figure 7

Dans la description des rugosités avec une rose, les changements dans un secteur sont matérialisés par des arcs de cercle. Il est rare que les changements de rugosité réels puissent être décrits par un arc cercle car dans la bande comprise entre deux arcs, le terrain présente différentes rugosités. Cette situation est résolue en donnant à la bande une rugosité moyenne calculée de la manière indiquée dans l'exemple suivant :

50% de la bande présente une rugosité de classe 2, 25% une rugosité de classe 1 et 25% une rugosité de classe 3, la rugosité moyenne s'établi alors comme suit :  $0,5 \times 2 + 0,25 \times 1 + 0,25 \times 3 = 2$ .

La méthode de l'Atlas Eolien Européen recommande de construire des roses de rugosités formées de bandes dont la largeur double à mesure que l'on s'éloigne de l'éolienne ; si la 1<sup>ère</sup> bande à une largeur de 500 m, la 2<sup>ème</sup> devra avoir une largeur de 1000 m etc.

Ainsi une bande de 1000 m de rugosité de classe 1, traversée en son milieu par une haie de 10m de hauteur devra se voir attribuer une rugosité moyenne de 2. La bande ne devra pas être divisée en une 1<sup>ère</sup> bande de rugosité 1, suivie d'une 2<sup>ème</sup> bande de rugosité 3 correspondant à largeur de la haie et d'une 3<sup>ème</sup> bande de rugosité 1, comme on le voit fréquemment !

Autre règle importante : la rugosité doit être donnée en fonction de la couverture des sols, indépendamment de leur altitude. Les rugosités d'une zone dont l'altitude est inférieure à celle du pied de l'éolienne et celles se trouvant au pied de l'éolienne doivent être décrites en appliquant les mêmes règles.

Dans la pratique, la description des rugosités se fait essentiellement avec à l'écran en utilisant des cartes. Néanmoins, il est important d'effectuer une visite du site pour vérifier la nature réelle de la couverture des sols et mieux estimer leur rugosité.

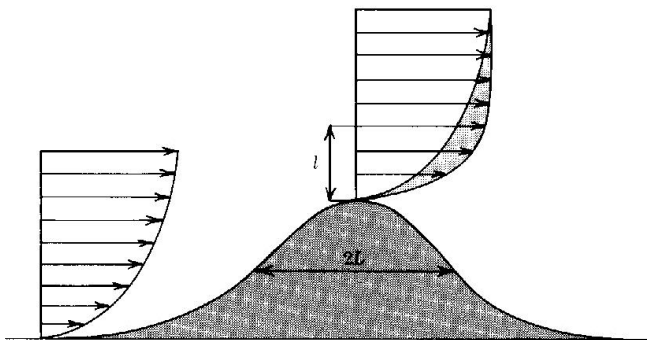
Il est important de faire la visite du site avec la carte en main afin de vérifier l'exactitude des informations topographiques et de noter la porosité des obstacles.

### 3.2.1.3 Description du relief avec ATLAS

Quand un écoulement d'air rencontre une colline simple comme celle représentée à la Figure 8, la vitesse de l'écoulement se modifie. Par rapport à la vitesse de l'écoulement non perturbé, la vitesse de l'écoulement aval et en amont de la colline diminue, par contre elle augmente au sommet de la colline. Si une éolienne est placée sur le sommet, elle bénéficiera de cette augmentation de la vitesse.

Si le terrain n'est pas formé de collines simples, mais présente un relief complexe, montagneux par ex., le programme WAsP, décrit dans le paragraphe suivant, devra être utilisé.

Si une éolienne est placée au sommet d'une colline, ATLAS calcule son effet à partir d'un modèle simple qui utilise la hauteur et la distance du sommet par rapport au pied de la colline dans chaque secteur.



La Figure 8 illustre l'accroissement de la vitesse du vent au sommet d'une colline. Cet accroissement de la vitesse du vent résulte d'un effet Venturi (la réduction de la section de passage d'un écoulement augmente la vitesse de celui-ci étant donné que la quantité fluide transitant reste identique).

Figure 8

Les falaises et autres changements abrupts du relief ne doivent pas être décrits avec la méthode présentée ici. D'autres modèles (CFDs) doivent être utilisés pour rendre compte de leurs effets. L'installation d'éoliennes au bord de falaises ou sur des reliefs abrupts doit se faire avec la plus grande prudence.

La Figure 9 illustre l'augmentation de la production d'une éolienne se trouvant sur le sommet d'une colline à base circulaire.

Pour les collines de très petit diamètre le modèle est différent, l'effet est simulé par une augmentation de la hauteur de moyeu. Si on utilise le modèle mathématique du « Windatlas pour le Danemark » le résultat se traduit par diminution de la vitesse du vent.

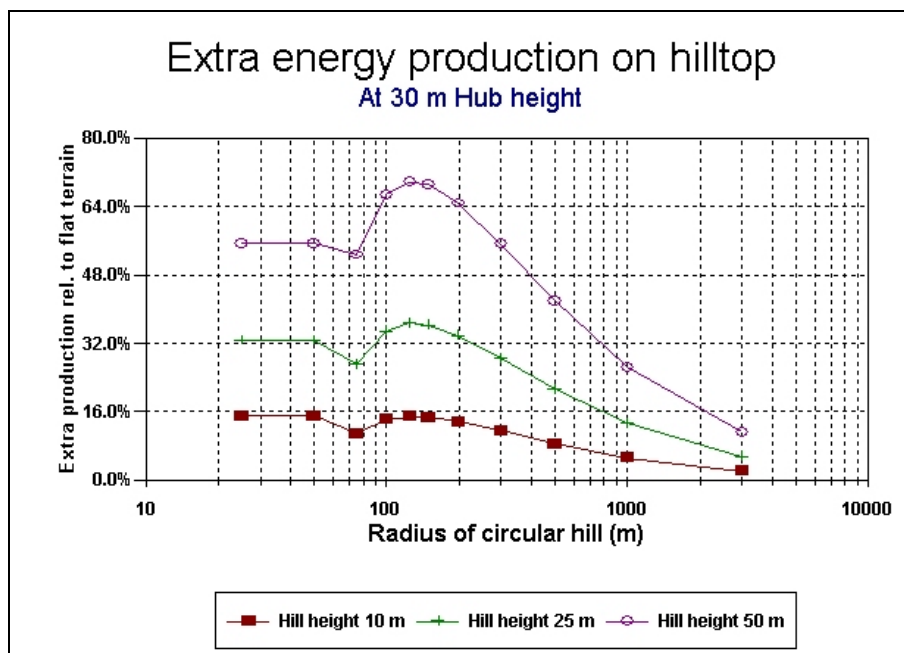


Figure 9



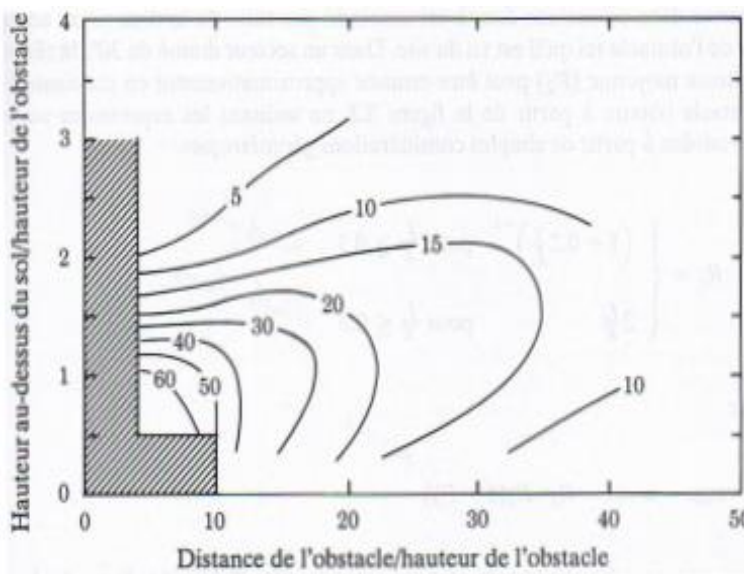
### 3.2.1.4 Description des obstacles avec ATLAS

Les bâtiments, les haies, etc., se trouvant à moins de 1000m du pied de l'éolienne et dont la hauteur dépasse le 1/4 de la hauteur du moyeu de l'éolienne, doivent être considérés comme obstacles et non comme éléments de rugosité.

Les dimensions des obstacles sont estimées visuellement lors de la visite du site, la précision de l'estimation dépend de l'expérience de la personne. Leur éloignement pourra être établi exactement à posteriori à l'aide d'une carte.

Un obstacle dont la hauteur est inférieure au 1/4 de la hauteur du moyeu de l'éolienne ou se trouvant à plus de 1000 m de l'éolienne n'est pas à prendre en compte en temps qu'obstacle, par contre il devra être pris en compte pour établir la rugosité.

La connaissance des dimensions de l'obstacle ne suffit pas, il faut également connaître sa porosité.



La Figure 10 montre comment le programme calcule l'effet d'un obstacle.

Figure 10

### 3.2.1.5 Description du relief et des obstacles avec WAsP

Le module MODELES avec WAsP-Interface permet d'utiliser le programme WAsP de l'institut Risø pour faire les calculs. Le programme WAsP calcule les effets du relief et des obstacles à partir d'un modèle d'écoulement. Cela exige une description du terrain plus détaillée qu'avec ATLAS. Le relief doit être décrit par des courbes de niveau numérisées. Les obstacles se décrivent avec des parallélépipèdes que l'on peut dimensionner et disposer librement sans limitation de nombre par secteur (pour plus d'information, consultez le manuel utilisateur de WAsP).

### 3.2.1.6 Calculs effectués par RESSOURCE

RESSOURCE répète automatiquement un calcul WAsP en chaque point de la zone étudiée (les points sont définis comme les nœuds d'une maille dont on indique la finesse). L'avantage par rapport à WAsP utilisé seul est la possibilité d'inclure des obstacles et d'utiliser plusieurs *Statistiques éoliennes*. Cette dernière possibilité permet une transition progressive entre les différentes climatologies du vent pouvant exister dans la zone étudiée, le tout en une seule opération.

### 3.2.2 Calculs à partir des mesures de vent

Les calculs de productible avec le module METEO utilisent les mesures de vent. On peut utiliser au choix :

- directement la série temporelle des vitesses de vent -> option TIME SERIES,
- l'histogramme des vitesses de vent -> option MEASURE,
- la distribution de Weibull (ajustant l'histogramme des vitesses du vent) -> option WEIBULL.

Le productible annuel est la somme des heures de fonctionnement par la puissance correspondante de l'éolienne. La puissance à une vitesse de vent donnée est extraite de la courbe de puissance de l'éolienne, le nombre d'heures à cette même vitesse de vent est donné par les mesures sous les différentes formes listées ci-dessus.

Note : si les mesures n'ont pas été corrigées pour être représentatives du long terme, le productible ne le sera pas non plus.

Si la hauteur de moyeu de l'éolienne est différente de la hauteur des mesures, le programme demandera la valeur de l'exposant  $\alpha$  qui devra être utilisé pour calculer la vitesse du vent à hauteur de moyeu. L'extrapolation se fait en utilisant la formule de calcul suivante :

$$V(h_2) = V(h_1) \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha$$

où :

- $V(h_1)$  = vitesse du vent à la hauteur  $h_1$
- $V(h_2)$  = vitesse du vent à la hauteur  $h_2$
- $\alpha$  = est l'exposant de Hellman (cisaillement)

L'incertitude est très élevée quand les extrapolations s'appliquent à des différences de hauteurs importantes (supérieures à 20-30%).

Si on ne connaît pas la valeur de  $\alpha$  on peut utiliser le tableau suivant, extrait du « Windatlas » du Danemark, qui établit la correspondance entre la rugosité du terrain et la valeur de  $\alpha$ .

Cette correspondance ne peut pas s'appliquer partout dans le monde et sur tous les terrains (complexes ou même simplement vallonnés). Cette correspondance devra être utilisée avec la plus grande prudence et réservée à des extrapolations de faible ampleur.

Classe de rugosité	Longueur de rugosité	Exposant de Hellman
0	0,0002	0,10
1	0,03	0,15
2	0,1	0,20
3	0,4	0,30

Cisaillement moyen pour le site de Belringe				
Hauteur	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3
10-25 m	0,10	0,19	0,22	0,30
25-50 m	0,10	0,20	0,22	0,26
50-100 m	0,11	0,23	0,24	0,26
100-200 m	0,12	0,28	0,27	0,27

Le tableau de gauche date de l'époque où seulement des éoliennes de faible hauteur étaient utilisées. Les valeurs détaillées du cisaillement du tableau de droite montrent que le cisaillement n'est pas le même à toutes les hauteurs de moyeux, les valeurs résultent du cisaillement produit par le terrain corrigées par un modèle de stabilité atmosphérique (comme avec WASP).

Si on dispose d'une seule distribution de Weibull à une seule hauteur il faudra déterminer un exposant de Hellman global. A cet effet, on pourra estimer le cisaillement dans chacun des secteurs, à l'aide du tableau ci-dessus, et en faire la moyenne en pondérant chaque valeur par la fréquence du vent dans son secteur.

Comme indiqué antérieurement, le calcul d'un productible peut se faire à partir des différentes formes d'expression des mesures. Il est recommandé d'utiliser l'option WEIBULL qui lisse la distribution et minimise ainsi l'influence des données anormales.

Dans WindPRO, l'ajustement de la distribution de Weibull se fait conformément à la procédure indiquée dans l'Atlas Eolien Européen qui donne un poids plus faible aux basses vitesses du vent qu'à celles normalement exploitées par les éoliennes.

### 3.2.3 Description du modèle PARK (pertes dues aux sillages)

Quand une éolienne se trouve dans le sillage aérodynamique d'une autre éolienne sa production d'énergie se trouve réduite. Le module PARK calcule les réductions de productible dues aux sillages appelées « pertes parc ». Le module PARK propose plusieurs modèles pour calculer les pertes. La description détaillée de ces modèles est donnée en annexe.

EMD recommande d'utiliser le modèle développé par N.O. Jensen de RISØ, auquel des modifications ont été apportées afin de pouvoir calculer les pertes dans un parc composé d'éoliennes de types et de hauteurs de moyeu différents.

La formule de base à partir de laquelle sont calculées les « pertes parc » est la suivante :

$$V = U \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{1 - C_t} \right) \left( \frac{D}{D + 2kX} \right)^2 \right]$$

où :

$V$  = vitesse du vent en aval de l'éolienne à une distance  $X$  du rotor

$U$  = vitesse en amont de l'éolienne

$D$  = diamètre du rotor de l'éolienne

$C_t$  = coefficient de trainée aérodynamique de l'éolienne

$k$  = constante de décroissance du sillage. La terminologie anglaise « WDC (Wake Decay Constant) » est parfois utilisée dans le reste du manuel et dans WindPRO.

WindPRO extrait les valeurs de  $C_t$ , qui est fonction de la vitesse du vent, à partir des courbes de  $C_t$  des éoliennes.

La Figure 11 montre la réduction de la vitesse du vent dans le sillage d'une éolienne calculée à partir de la formule de base antérieure. La constante de décroissance du sillage  $k$  correspond à la tangente du  $\frac{1}{2}$  angle du cône formé par le sillage.  $k$  rend compte de l'ouverture du cône où la vitesse de l'écoulement est réduite. La valeur de  $k$  recommandée par défaut égale 0,075 et correspond à  $\frac{1}{2}$  angle du cône = 4,29°.

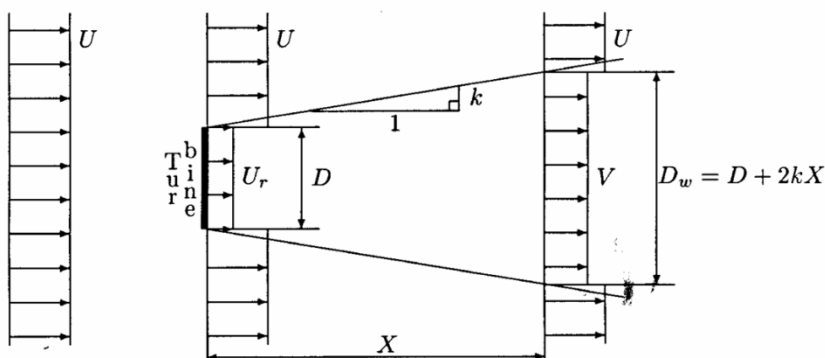


Figure 11

Les études effectuées par l'institut RISØ montrent que la valeur de  $k$  dépend de la turbulence qui elle-même dépend de la rugosité du terrain. La valeur de  $k$  varie de 0,04 pour une rugosité de classe 0 à 0,1 pour une rugosité de classe 3. Les erreurs résultant de l'utilisation systématique de la valeur 0,075, proposée par défaut, pour les calculs à terre sont minimes. Pour les calculs offshore il faut utiliser  $k = 0,04$ .

Remarque: dans le cas des grands parcs éoliens (plus de 5 rangées d'éoliennes perpendiculaires à la direction dominante du vent), les mesures ont montré que le modèle PARK ne permet pas de calculer les pertes dues aux sillages avec précision. Les grands parcs modifient la rugosité et par conséquent la vitesse du vent à l'intérieur du parc or le modèle de N.O Jensen ne prend pas en compte ce changement. Un module PARK amélioré devrait

voir le jour prochainement. Une manière de corriger cette déficience du module actuel est d'augmenter la rugosité du terrain à l'intérieur du parc, par ex. dans le cas d'un parc offshore on passe la classe de rugosité à 1,5 (soit une longueur de rugosité de 0,055).

Depuis la version 2.5, le module PARK a été enrichi par de nouveaux modèles pour le calcul des sillages et par des modèles pour le calcul des turbulences additionnelles induites par les sillages eux-mêmes. Plus d'information sur ces modèles est donnée en annexe.

### 3.2.3.0 Utilisation de plusieurs jeux de données.

Lors d'un calcul de productible avec PARK, l'utilisateur doit estimer si une seule distribution des vitesses du vent est suffisante pour l'ensemble du parc ou si plusieurs sont nécessaires. Aucune recommandation générale ne peut être faite, car le choix dépend de la complexité du terrain, de la taille du parc et de la précision requise.

S'il y a plusieurs distributions, le productible de chaque éolienne est calculé avec celle qui est la plus proche de l'éolienne.

---

## 3.2.4 Création d'un atlas éolien (ensemble de Statistiques éoliennes)

Si on dispose de mesures effectuées en un point du site ou de la région, une *Statistique éolienne* peut alors être générée qui servira pour les calculs avec WAsP et ATLAS, comme décrit au paragraphe 3.2.1.1. Cette statistique ne devrait pas être utilisée pour des points situés à plus de 100 km du lieu des mesures. La complexité du relief ainsi que les phénomènes méso-climatiques (comme ceux des régions côtières) peuvent réduire cette distance à moins de 1 km.

Le calcul d'une *Statistique éolienne* requiert WAsP, les modules METEO et MODELES, et de l'expérience dans le traitement des mesures de vent. La liaison entre ces modules se fait de manière automatique et transparente pour l'utilisateur lors du calcul des *Statistiques éoliennes*.

Mais logiquement les *Statistiques éoliennes* doivent être calculées à partir du module MCP/STATGEN afin de générer des *Statistiques éoliennes* à partir de mesures corrigées pour être représentatives des conditions sur le long terme.

Outre la création d'atlas éoliens, comme indiqué antérieurement, WindPRO permet d'importer des atlas générés avec WAsP (c.à.d. des *Statistiques éoliennes* sous forme de fichiers au format .lib ; voir la documentation WAsP pour plus d'informations).

---

## 3.2.5 WAsP model – focus on changes from WAsP 10.0

The WAsP model itself will not be explained here (see Risø/DTU manual), only the changes of high importance for the user in the more recent model versions. From the very first versions until and including ver. 9, the model itself only has changed marginally, and the calculation results thereby so. The major improvements during the WAsP model versions are capability to handle more map file points. But from version 10.0, model modifications are seen. These mainly relates to stability correction handling, and especially offshore and near shore. But also roughness map interpretation. The corrections were partly included in ver. 10.0, but first fully implemented in ver. 10.1 - 10.2. We therefore do not recommend using ver. 10.0 in offshore or coastal regions. The corrections relate to as well the default heat flux parameters, the way roughness in coastal zone is interpreted, as formula modifications. The result of the corrections is a more smooth change between on shore and offshore stability correction. But it is also a some different wind statistic for the offshore part, if it is generated from WAsP 9 or 10.2. **This mean that an offshore or near shore wind statistic made from WAsP 9 SHOULD NOT be used from WAsP 10.2 or the other way round.**

This can best be illustrated by an example: 4 wind statistics are generated from same time series data:

**Mean wind speed [m/s]**

Height [m]	Roughness class/Length			
	0	1	2	3
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	7,4	5,2	4,5	3,6
25,0	8,1	6,2	5,6	4,7
50,0	8,7	7,1	6,5	5,6
100,0	9,4	8,4	7,7	6,7
200,0	10,3	10,3	9,4	8,2

**Mean wind speed [m/s]**

Height [m]	Roughness class/Length			
	0	1	2	3
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	9,0	6,4	5,6	4,4
25,0	9,8	7,5	6,8	5,7
50,0	10,5	8,6	7,8	6,8
100,0	11,3	9,8	9,1	8,1
200,0	12,2	11,7	10,8	9,5

**Mean wind speed [m/s]**

Height [m]	Roughness class/Length				
	0	1	2	3	4
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m	1,50 m
10,0	7,4	5,4	4,7	3,7	2,5
25,0	8,1	6,4	5,8	4,8	3,7
50,0	8,7	7,4	6,7	5,8	4,7
100,0	9,4	8,6	7,9	7,0	5,9
200,0	10,2	10,3	9,5	8,5	7,3

**Mean wind speed [m/s]**

Height [m]	Roughness class/Length				
	0	1	2	3	4
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m	1,50 m
10,0	8,7	6,4	5,6	4,4	2,9
25,0	9,5	7,5	6,8	5,7	4,4
50,0	10,2	8,6	7,8	6,8	5,6
100,0	10,9	9,8	9,1	8,1	6,8
200,0	11,8	11,5	10,7	9,6	8,3

Upper WAsP 9, lower WAsP 10.2

Left roughness class 0 based site, right, class 1 based site.

In the left part, the offshore site, the class 0 data are almost the same with the two WAsP versions. The highest level, 200m although slightly lower with WAsP 10.2 – a part of the formula modification. BUT, for the onshore classes, the wind speeds are essentially higher, round 0.2 m/s. **This mean that a WAsP 10.2 calculation could calculate up to round 10% higher AEP then WAsP 9 at an onshore site, if the data basis were offshore.**

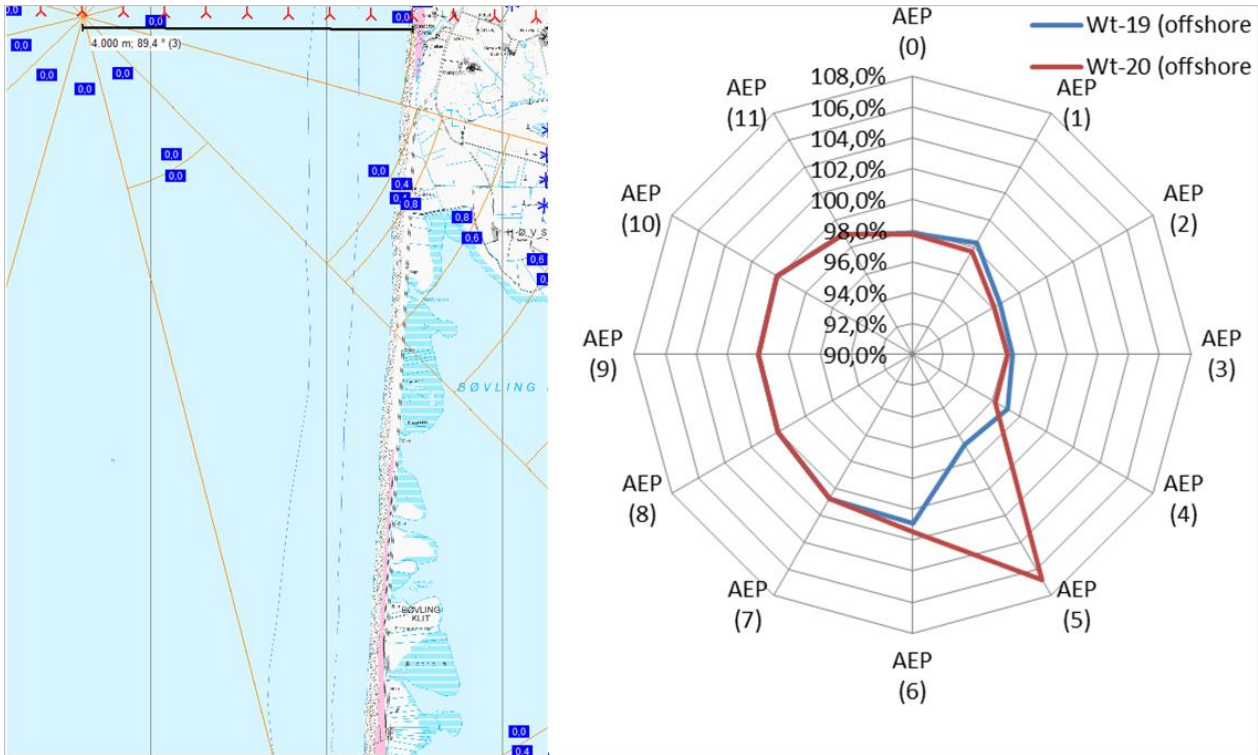
In the right part, the onshore site, the onshore class data 1, 2 and 3 are almost identical from the two versions, again 200m slightly lower with WAsP 10.2 – a part of the formula modification. BUT the class 0 data is round 0.3 m/s lower when calculated with 10.2. **This mean that a WAsP 10.2 calculation would calculate up to round 10% lower AEP at an offshore site, if the data basis were onshore.**

The changes are of cause not serious, as long data just is used where they belong. But it shall be noticed that in the coastal region, where there partly are water and partly land, quite unpredictable changes can be seen and here it will especially be important to use same WAsP version for generation of wind statistic and later use.

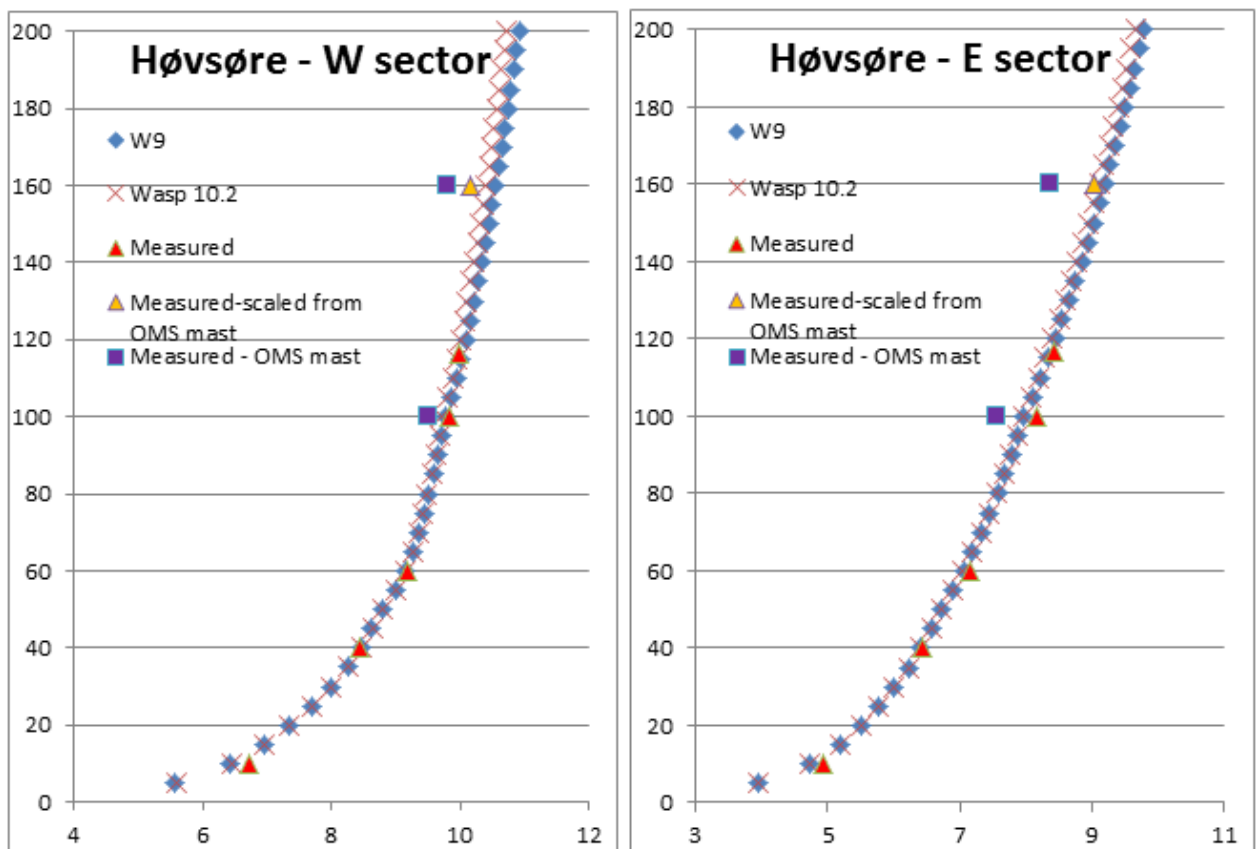
From the tables are also seen that with large hub heights, >100m, WAsP 10.2 calculates slightly lower wind speeds than WAsP 9 – this is so both on and offshore and a result of a general modification of the stability correction model. Based on good test data offshore from tall mast this correction seems to give a better reproduction of the measurements.

The following example illustrates the improvement regarding smoothing stability model shift. Two turbines just 200m apart, both round 4 km offshore are calculated. In sector 5, there is a roughness change from class 0 to class 0.4 in 10 km distance. The graphs show the ratio of the calculated AEP between WAsP9/WAsP10.2. Looking at the rose, it is seen that in sector 5 it is very different what happen for the two turbines. This is where the distance to roughness change in sector 5 is just around 10 km, a change from 0 to a higher class decides that W9 shall change between on and offshore stability in that direction. The parameter: "Width of coastal zone" decides this – can be changed but is default 10 km. It's an obvious inconsistency, which is in WAsP 9, but not in WAsP 10.2. But the graph also show how the calculation results are smaller in general with WAsP 9, when the wind come from land, while the 9 and 10.2 results are the same when wind comes from the open sea.

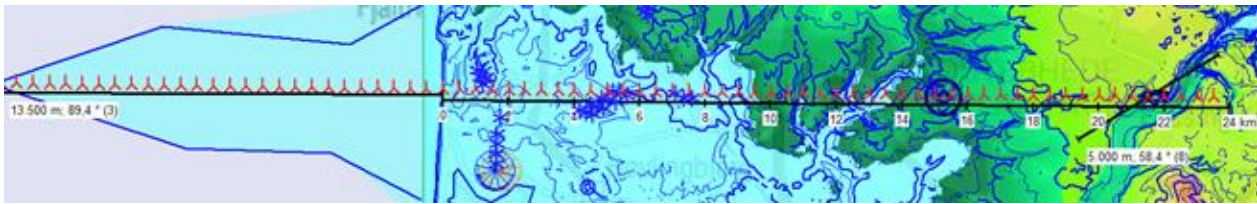




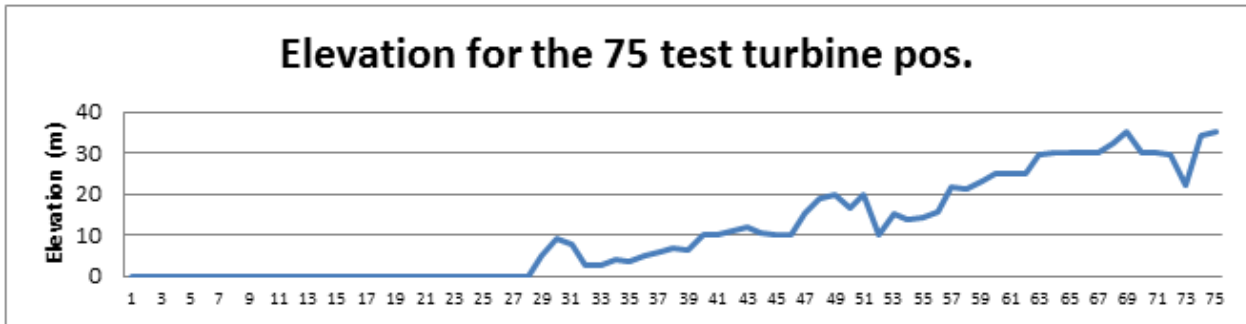
A test on reproducing measured profiles in large heights is shown below. It is seen that WASP 10.2 does predict the vertical profile slightly better than W9. (Here WASP 10.1i is the same as WASP 10.2).



Finally we will report tests of calculation in coastal region with different hub heights. The calculation setup:

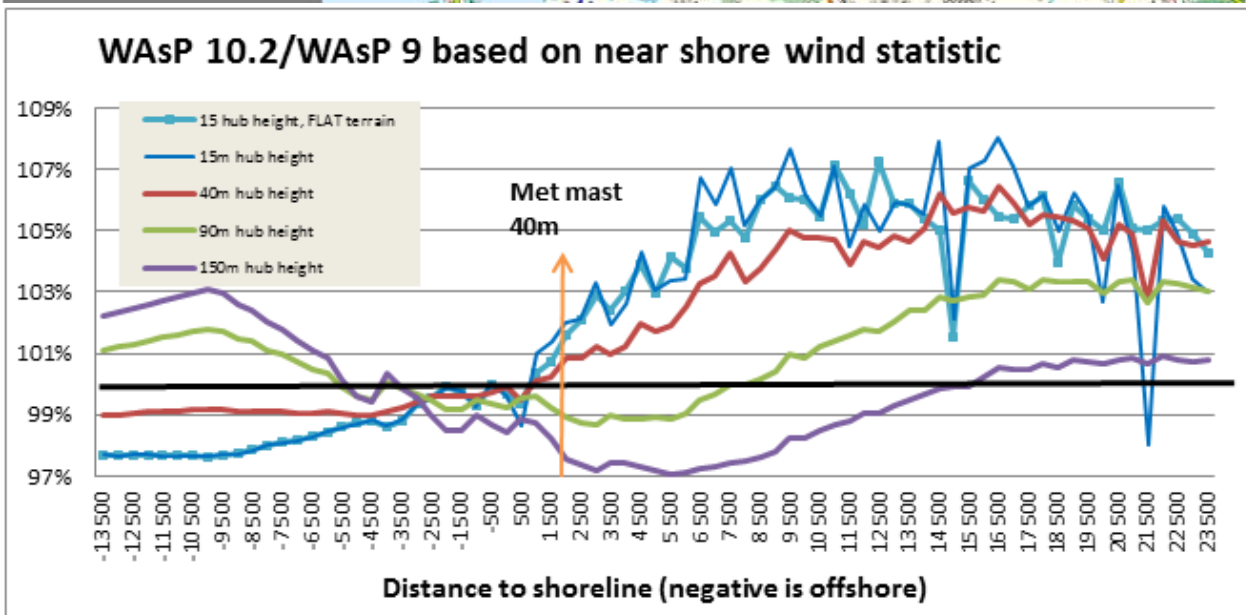


Map with the orography in focus – elevation is seen below.



Based on met mast 1800m from west coast, a row of turbines are calculated based on the two different WAsP versions, where the wind statistics are generated with same version as in calculation. The turbine row starts 13,5 km offshore and ends 23,5 km onshore.

The map gives an idea of the surface roughness around the test row. The row crosses a large forest area along the onshore part.



For 15 m hub height there is two variants, one calculated without orography, one with. For all other heights orography is included, and for all calculations digital roughness maps are included.

It is seen that there are quite some differences in the WAsP 10.2 and WAsP 9 results, but not that easy to describe in a clear conclusion. Starting with the 150m hub height, WAsP 10.2 results are round 1% lower first 3 km offshore, but then getting up to 3% higher at round 10 km offshore. Onshore the results are lower the first 15 km, up to 3%, but get then slightly higher. A “reversed” pattern is seen for very low hub heights, but with up to 8% higher results onshore. Two dramatic peaks are seen. These have been investigated further. The leftmost peak is due to differences in roughness interpretation in the two models, the rightmost is due to different orography modeling.

Concluding on WAsP 10.2 vs WAsP 9. There are obvious improvements, and especially offshore as in coastal regions we recommend using WAsP 10.2, due to better reproduction of the measured shear. For fully onshore sites (when measurements also are fully on shore) there seem only to be differences when hub heights are > 100m. But if measurements are in coastal regions, the changes in calculation results can be quite large. We cannot yet say based on actual turbines if the one or the other model performs better. But the most important conclusion is: **Do not use different WAsP versions in future in coastal regions to generate and use wind statistics! By this follow for DK especially: Do not use WAsP 10.2 (or higher) together with Wind statistic DENMARK’07 in costal regions!**

## 3.3 Entrée des données

### 3.3.0 Introduction

Ce chapitre décrit la manière d'entrer les données nécessaires aux calculs de productibles annuels avec WindPRO (dont une brève description a été donnée au paragraphe 3.0.1).

Les opérations préalables à l'introduction des données spécifiques aux calculs de productibles telles que la création du projet, l'importation des cartes, etc., sont décrites dans la section 2 BASIS.

Les objets utilisés pour les calculs de productibles sont présentés à la suite :



Objet *Données-site*. Dans cet objet, on indique les *Statistiques éoliennes*, la source des données altimétriques et la source des données de rugosité qui devront être utilisées par MODELE ou PARK. Pour les calculs STATGEN (calcul de *Statistiques éoliennes*), on utilise également cet objet pour indiquer la source des données altimétriques et la source des données de rugosité à utiliser.



Objet *Météo*. Cet objet contient les données de vent qui devront être utilisées. Des données sous forme de séries temporelles, de tableaux (histogrammes) ou de distributions de Weibull peuvent être consignées dans l'objet.

C'est à partir des données de vent d'un objet *Météo* et de la description du terrain avec un objet *Données-site* qu'est calculée, avec WAsP, une *Statistique éolienne* (au format WindPRO .wws ou WAsP .lib).

C'est à partir des données de vent contenues dans un objet *Météo*, dans des *Statistiques éoliennes* (sélectionnées via un objet *Données-site*) ou dans un fichier ressources éoliennes (.rsf) que se font les calculs PARK.



Objet *Obstacle*. Il s'utilise avec WAsP uniquement. Il ne peut pas être utilisé avec ATLAS.

Les objets suivants sont également utilisés mais ils ne sont pas spécifiques aux calculs de productibles (leur description a été faite dans la section 2 BASIS) :



Objet *Nouvelle-éolienne*.



Objet *Eolienne-existante*.



Objet *Données-lignes* (pour entrer des courbes de niveau ou des lignes de rugosité).



Objet *Maille-altimétrique* (pour entrer les données altimétriques, peut être utilisé à la place de l'objet *Données-lignes* pour la description du relief).



Objet *Données-surfaces* (pour entrer les rugosités en les délimitant par des polygones).

### 3.3.1 Entrée des données pour les calculs avec MODELES

Le calcul des caractéristiques du vent à l'emplacement de chaque éolienne, à partir des mesures de vent effectuées à l'aide d'un mât, nécessite un modèle d'écoulement du vent. Le modèle le plus communément utilisé est celui mis en œuvre par WAsP.

Une fois les caractéristiques du vent établies à l'emplacement de chaque éolienne avec WAsP, un modèle est utilisé (PARK) pour calculer les réductions de la vitesse du vent à l'emplacement de chaque éolienne produites par les sillages aérodynamiques.

Enfin, à partir des vitesses réduites du vent et des courbes de puissance des éoliennes, corrigées en fonction de la densité de l'air, est calculé le productible annuel du parc.

Des alternatives à WAsP existent :

- ATLAS est une version « simplifiée » de WAsP proposée par WindPRO.
- Les logiciels CFD quand ils sont capables de produire des cartes de ressources éoliennes aux formats .rsf ou wrg. Quand des cartes de ressources éoliennes sont utilisées, les mesures de vent, les descriptions du relief et des rugosités sont inutiles.

#### 3.3.1.0 Objet Données-site. Onglet Position/Usage

Pour créer un objet *Données-site* :

- Cliquez sur l'objet dans la barre d'icônes à droite de l'écran,
- Placez-le sur la carte à l'emplacement du site étudié,
- Dès que l'objet est placé, la fenêtre *Propriétés objet Données-site* s'ouvre automatiquement sur l'onglet *Position/Usage*, voir Figure 12.

L'objet *Données-site* se place normalement au centre du parc éolien. Mais, s'il vous plaît, lisez attentivement la suite :

Si les rugosités sont décrites en utilisant la rose de l'objet, cette description sera utilisée pour toutes les éoliennes du parc, ce qui est incorrect car la rugosité vue depuis un emplacement est différente de celle vue depuis un autre emplacement.

Si nécessaire, pour améliorer la description on peut utiliser plusieurs roses en créant plusieurs objets *Données-site*. Ainsi, pour chaque éolienne du parc la rose des rugosités de l'objet *Données-site* le plus proche sera utilisée pour le calcul de son productible.

A noter que lorsqu'ATLAS est utilisé cette remarque s'applique en plus aux obstacles et aux collines.

Si les rugosités sont décrites par des lignes ou par des polygones (WAsP est requis pour l'utilisation de ces descriptions), un seul objet *Données-site* est suffisant et une rose des rugosités est établie à l'emplacement de chaque éolienne à partir de ces informations (pour des informations sur les lignes de rugosité voir 3.6.1.0 et pour des informations sur les polygones voir la section 2 BASIS).

Si l'orographie est décrite avec des courbes de niveau (WAsP est requis pour l'utilisation de cette description), le productible est calculée en tenant compte de l'orographie à l'emplacement de chaque éolienne.

Immédiatement après la création de l'objet *Données-site*, il faut indiquer son usage dans le cadre *Usage de l'objet* de l'onglet *Position/Usage*, voir Figure 12.

Les autres parties de cet onglet sont communes à tous les objets, reportez-vous à la section 2 BASIS pour leur description.

Remarque : l'altitude Z de l'objet n'a aucune influence sur le résultat des calculs et peut être omise.

Dans le cadre *Usage de l'objet* pour pouvez choisir d'effectuer les *Calculs de productibles avec ATLAS*, les *Calculs de productibles avec WAsP* ou les *Calculs de productibles avec ATLAS et/ou WAsP* ; dans ce dernier cas vous devrez entrer les informations relatives au relief et à la rugosité pour les deux modèles et choisir soit ATLAS soit WAsP au lancement du calcul.

L'objet *Données-site* s'utilise aussi pour le calcul d'une *Statistique éolienne* (voir 3.0.1.3), ou pour générer une carte de ressources éoliennes (voir 3.6).



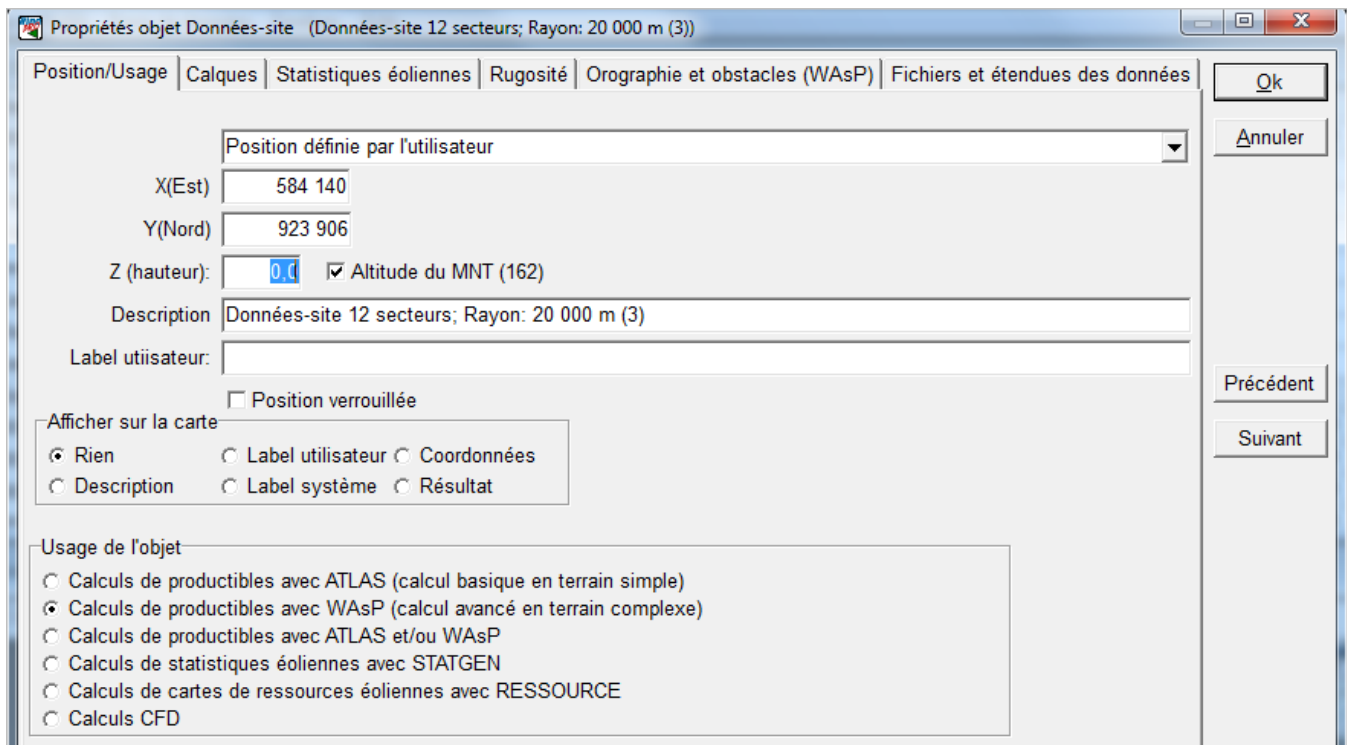


Figure 12

Le choix de l'Usage de l'objet va déterminer les onglets qui vont s'afficher et par conséquent le type de données qui vont être demandées.

Ainsi les descriptions du relief et des obstacles pour les *Calculs de productibles avec ATLAS* sont différentes de celles pour les *Calculs de productibles avec WAsP*.

Les usages pour les *Calculs de Statistiques éoliennes* et pour les *Calculs de cartes de ressources éoliennes* font appel à WAsP et donc les descriptions des rugosités et du relief sont identiques à celles des *Calculs de productibles avec WAsP*.

Suivant l'usage choisi, la couleur d'affichage de l'objet change :



Noir – Pour les *Calculs de productibles avec ATLAS*.

Bleu – Pour les *Calculs de productibles avec WAsP*.

Turquoise – Pour les *Calculs de productibles avec ATLAS et/ou WAsP*.

Orange – Pour les *Calculs de Statistiques éoliennes avec STATGEN*.

Vert – Pour les *Calculs de cartes de ressources éoliennes avec RESSOURCE*

Violet – Pour les *Calculs CFD*

### 3.3.1.1 Objet Données-site. Onglet Statistiques éoliennes

La Figure 13 présente l'onglet *Statistiques éoliennes*.

Bouton *Modifier une statistique* ouvre une fenêtre de « maintenance » à partir de laquelle vous pouvez :

- Importer un fichier \*.lib et lui associer des coordonnées afin que la *Statistique éolienne* correspondante apparaisse sur la carte (atlas) de la fenêtre de sélection des *Statistiques éoliennes*.
- Introduire un facteur de correction à appliquer au productibles calculés à partir d'une *Statistique éolienne*.

Bouton *Convertir une statistique*, les informations correspondantes sont données au 3.4.4.

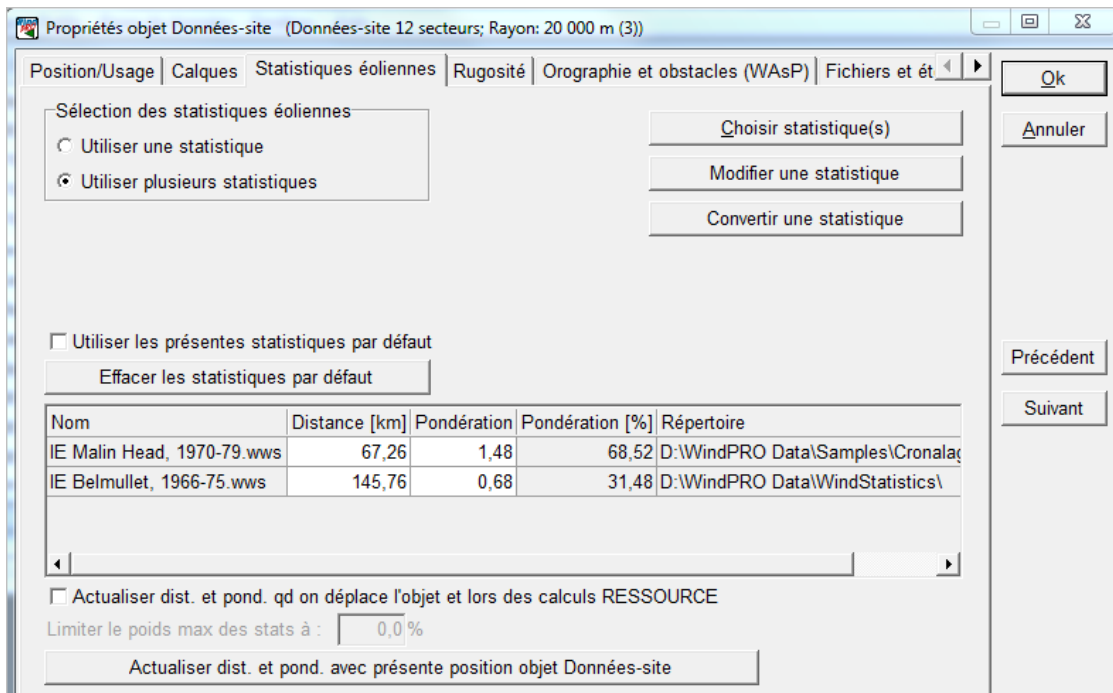


Figure 13

### Sélection des Statistiques éoliennes

On peut *Utiliser une statistique* ou *Utiliser plusieurs statistiques* pour un même calcul. Le choix se fait dans le cadre *Sélection des statistiques éoliennes*, voir Figure 13.

En cliquant sur le bouton *Choisir statistique(s)*, s'ouvre la fenêtre de la Figure 14 où plusieurs critères de filtrage sont disponibles pour sélectionner les statistiques.

Si aucun *Pays* et aucune *Source(s)* n'ont été sélectionnés toutes les *Statistiques éoliennes* de l'atlas s'afficheront. Plusieurs *Pays* et plusieurs *Source(s)* peuvent être sélectionnés en cliquant dessus.

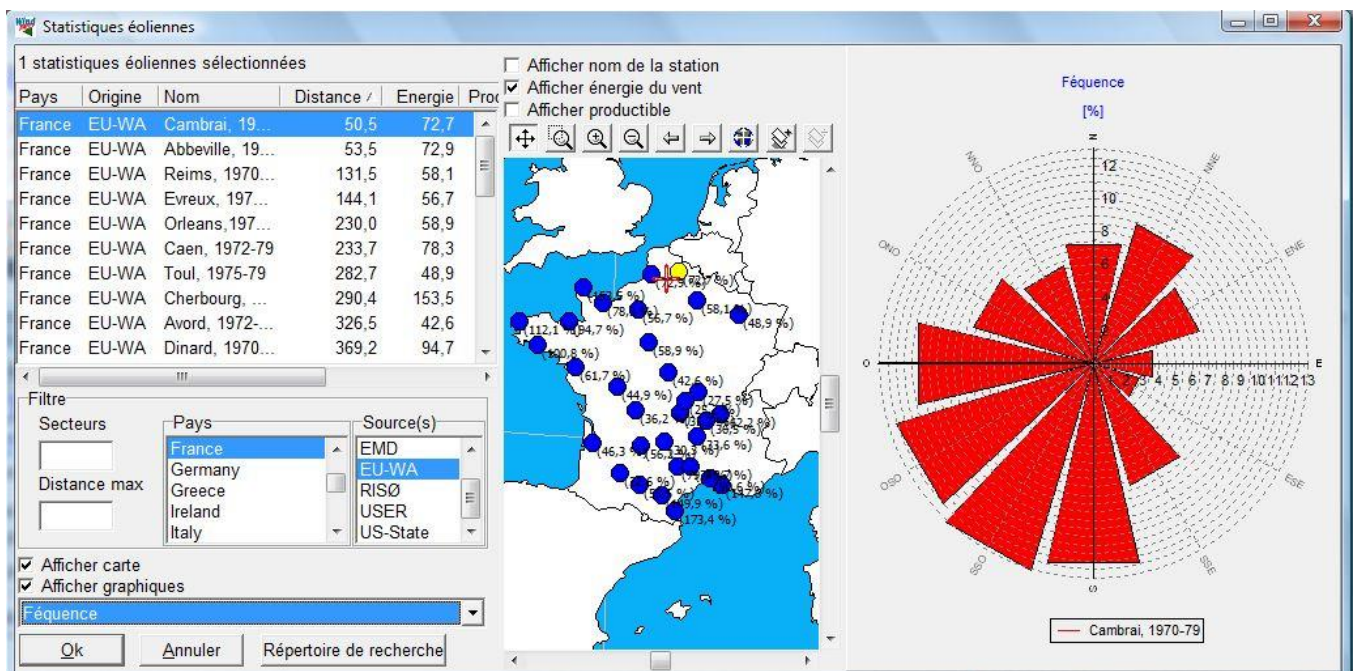


Figure 14

Remarque : pour des projets au Danemark, l'atlas « Danemark'07 » devrait toujours être utilisé. En effet, il contient des courbes de correction résultant de l'analyse des productibles d'un grand nombre d'éoliennes. Donc les informations de cet atlas sont sensiblement plus précises que celles d'autres atlas éoliens.

Remarque: un des points les plus importants pour les calculs de productibles est d'estimer la pertinence des *Statistiques éoliennes* utilisées. Un excellent moyen de détecter des erreurs est de comparer les statistiques utilisées avec d'autres statistiques de la même région. Avec WindPRO, la comparaison peut se faire sur l'*Energie du vent* ou sur le *Productible*.

La statistique éolienne de Beldringe, située au centre du Danemark, sert de référence. Elle est utilisée pour calculer l'énergie du vent à une hauteur = 50m sur un terrain plat ayant une rugosité de classe =1, ce qui donne 3300 kWh/m<sup>2</sup>/an, et le productible à cette même hauteur avec une courbe de puissance choisie pour le besoin, ce qui donne 1025 kWh/m<sup>2</sup>/an. Ces mêmes calculs sont réalisés dans les mêmes conditions avec toutes les statistiques et les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs de Beldringe, les résultats sont les pourcentages affichés sur la carte.

Note : si on est connecté à Internet, la visualisation des positions peut être faite sur Google Maps, voir Figure 15.

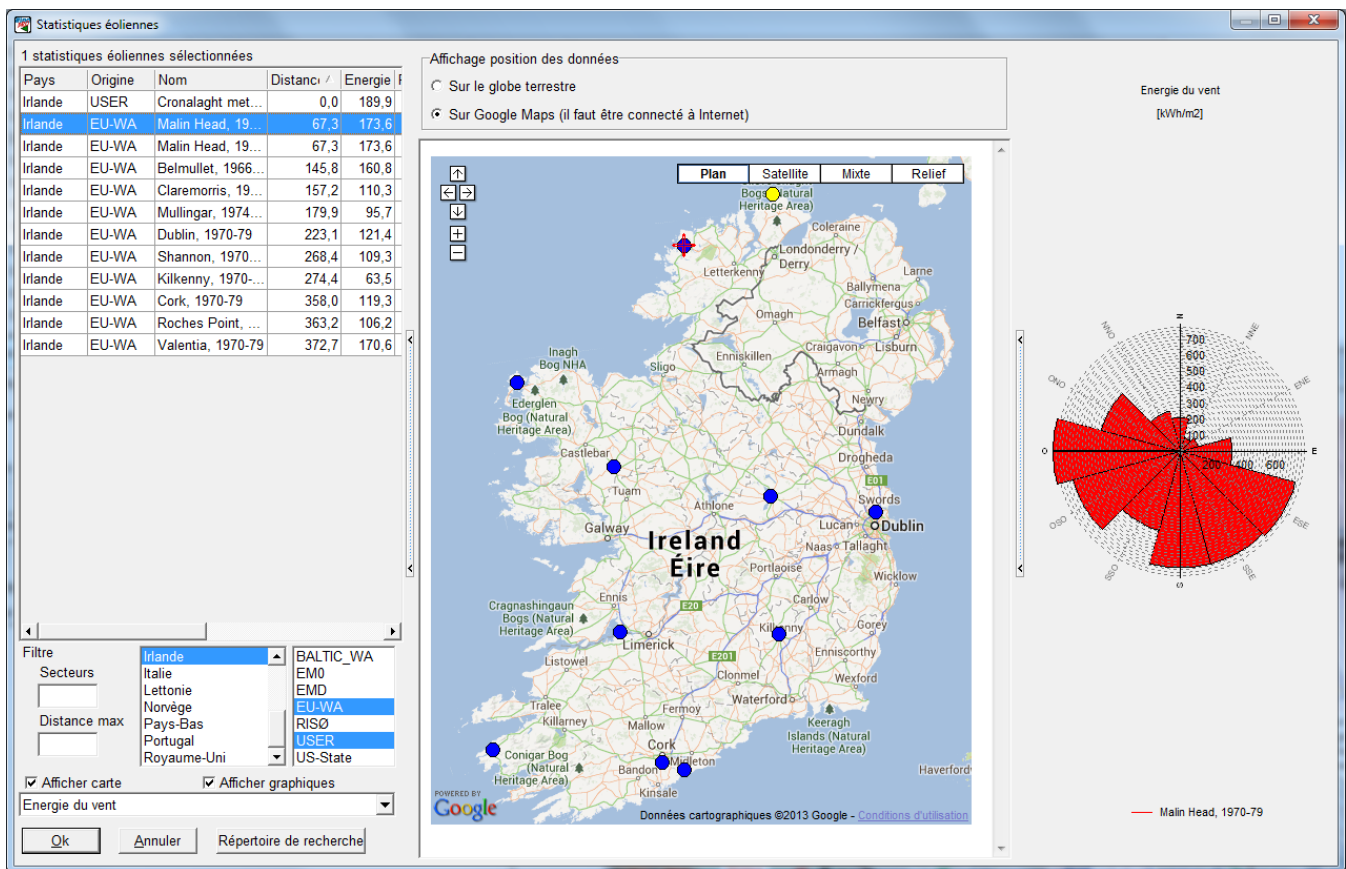


Figure 15

### 3.3.1.2 Objet Données-site. Onglet Rugosité

Le grand avantage de WindPRO est la possibilité de créer ou d'importer les cartes de rugosité puis de les examiner ou de les modifier directement sur le fond de carte à l'écran.

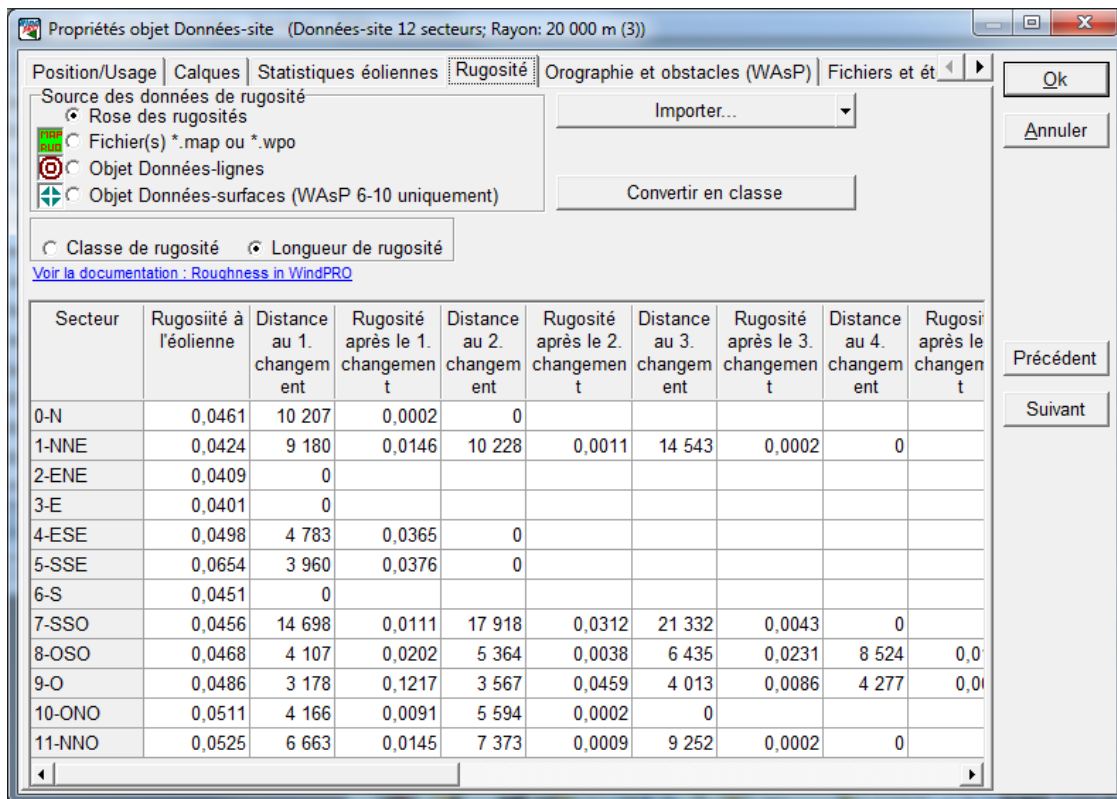


Figure 16

Quatre possibilités sont proposées pour l'introduction des rugosités, le choix se fait dans le cadre *Source des données de rugosité*, voir Figure 16.

#### Option Rose des rugosités

Les rugosités peuvent être entrées directement dans le tableau de la Figure 16, par exemple, dans le cas où vous ne disposez pas d'un fond de carte ou si on vous a communiqué la description en utilisant une rose.

Avec le bouton *Importer...*, vous pouvez importer dans le tableau et modifier des cartes de rugosité au format WAsP (fichiers .map) ou lire des fichiers .rds (description de la rugosité dans WAsP) issus de calculs effectués avec WAsP (voir explications à la suite).

#### Option Fichier(s) .map ou .wpo

Cette option permet d'indiquer qu'il faut utiliser les données de rugosité contenues dans des fichier(s) .map ou .wpo, les fichiers se sélectionnent dans l'onglet *Fichiers et étendues des données*.

#### Option Objet Données-lignes

Si les données de rugosité sont contenues dans un objet *Données-lignes*, cette option permet d'indiquer qu'il faut utiliser les données de rugosité de l'objet.

#### Option Objet Données-surfaces

Si les données de rugosité sont contenues dans un objet *Données-surfaces*, cette option permet d'indiquer qu'il faut utiliser les données de rugosité de l'objet.

Note : cette option n'est pas supportée avec les versions de WAsP > 10.0, car elle est incompatible avec le nouveau traitement de la correction de la stabilité.

Ces trois dernières méthodes présentent l'avantage de permettre le calcul de la rugosité vue de chaque emplacement d'éolienne individuellement. Pour plus des informations sur la numérisation des rugosités reportez-vous au 3.6.1.0 et la section 2 BASIS.



Remarque : les options *Classe de rugosité* et *Longueur de rugosité* ne servent pas à convertir les classes en longueurs et inversement, mais à indiquer le type des données qui sont entrées. Pour effectuer la conversion il faut cliquer sur le bouton *Convertir en....*

Création de la rose des rugosités directement à l'écran :

Il faut au préalable cocher l'option *Roses des rugosités* dans le cadre *Source des données de rugosité*, voir Figure 16.

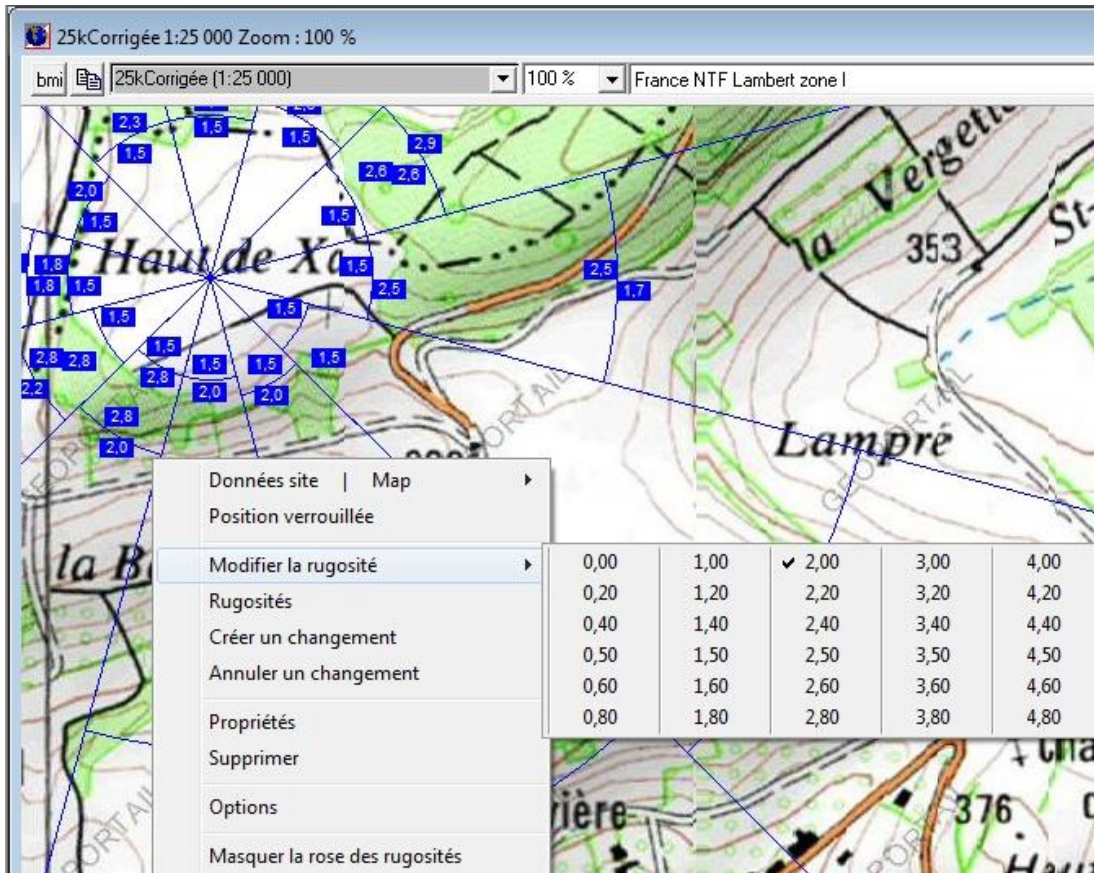


Figure 17

L'affichage de la rose à l'écran se fait par un clic avec le bouton droit de la souris sur l'objet *Données-site* puis en choisissant dans le menu contextuel *Afficher la rose des rugosités*

Ensuite un clic droit sur un secteur de la rose fait apparaître un menu contextuel, voir Figure 17, avec les options suivantes:

- *Modifier la rugosité* : permet de d'indiquer la classe de rugosité à l'endroit du clic sur la carte.
- *Rugosités* : idem avec plus de choix
- *Créer un changement* : permet de créer un changement de rugosité à l'endroit de la carte où le clic droit a été fait. L'arc de changement peut être déplacé directement en le faisant glisser avec la souris.
- *Annuler un changement* : permet de supprimer un changement à l'endroit de la carte où le clic droit a été fait. L'endroit prend alors la rugosité de la bande adjacente extérieure.
- *Propriétés* : ouvre la fenêtre des propriétés de l'objet *Données-site*.
- *Effacer* : supprime l'objet *Données-site*.
- *Options* : permet de définir le pas des changements de rugosité quand les arcs de changement sont déplacés avec la souris.
- *Masquer/Afficher rose des rugosités* : permet de masquer et d'afficher la rose qui peut se révéler gênante pour la lecture de la carte ou le travail avec d'autres objets.



### 3.3.1.3 Objet Données-site. Onglet ATLAS collines et obstacles

Les descriptions des rugosités, des collines et des obstacles pour un calcul avec ATLAS peuvent être entrées directement dans un tableau ou directement sur le fond de carte à l'écran, voir Figure 18. La méthode d'entrée graphique des informations est similaire à celle décrite au paragraphe précédent.

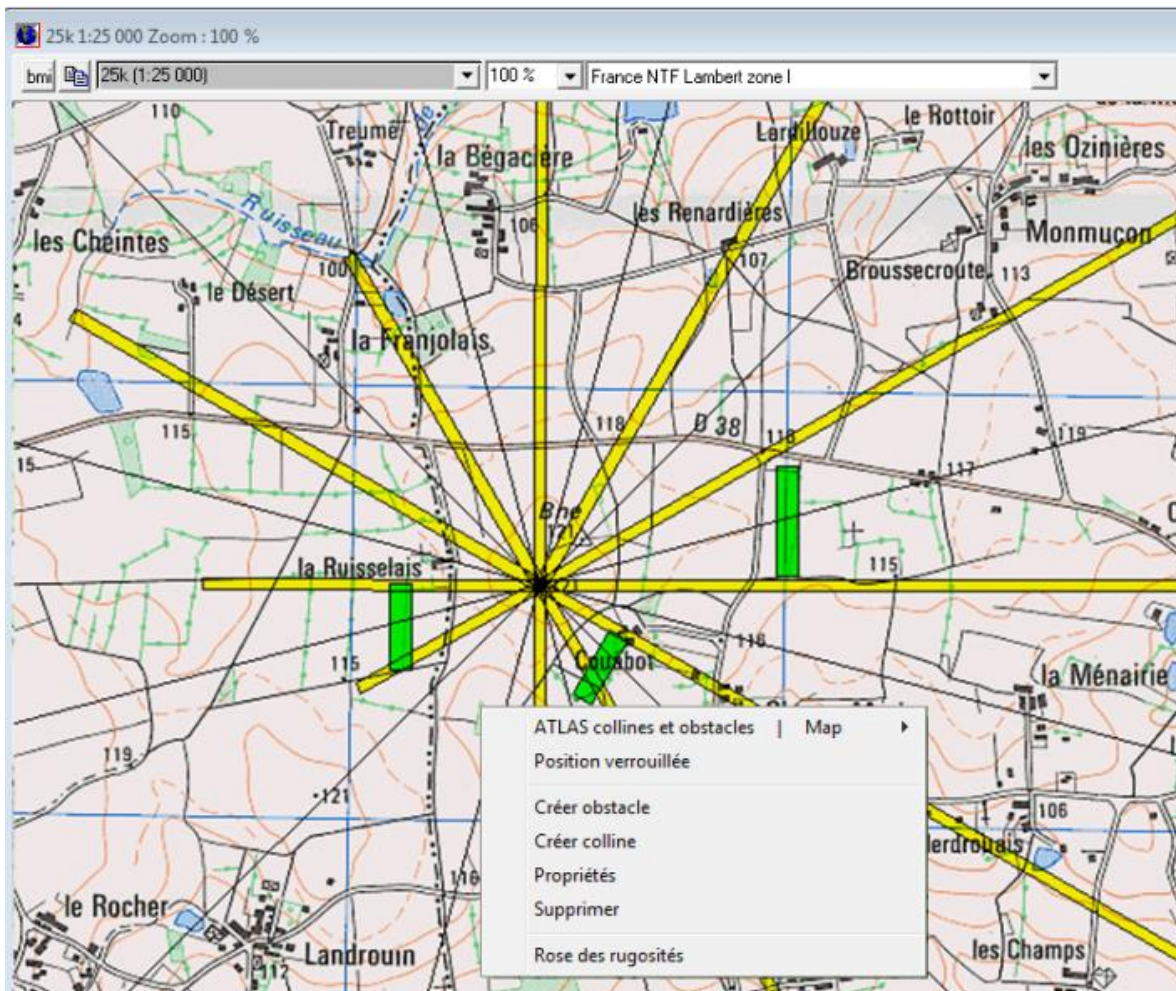


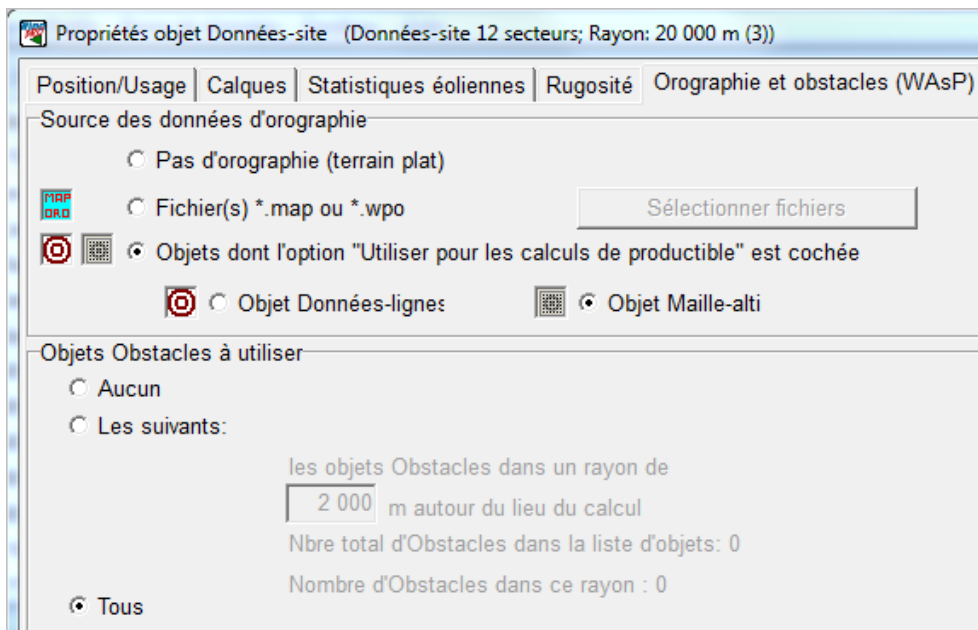
Figure 18

Quand une colline est entrée directement à l'écran, WindPRO calcule automatiquement les distances de l'objet *Données-site* au pied de la colline dans chaque secteur (*Longueur de la colline*). Par contre, les dénivelés doivent être entrés manuellement dans le tableau soit en indiquant l'*Altitude du pied de la colline* et la *Hauteur de la colline* (par rapport au pied) dans chaque secteur, soit la *Hauteur de la colline* dans chaque secteur et l'altitude de l'objet *Données-site*.

Quand un obstacle est entré directement à l'écran, WindPRO calcule automatiquement la *Distance de l'obstacle* par rapport à l'objet *Données-site* ainsi que la *Largeur de totale de l'obstacle* et *La largeur de l'obstacle dans le secteur*. Par contre, la *Hauteur de l'obstacle* et la *Porosité de l'obstacle* doivent être entrées manuellement.

Un seul obstacle et une seule hauteur de colline peuvent être entrés par secteur.

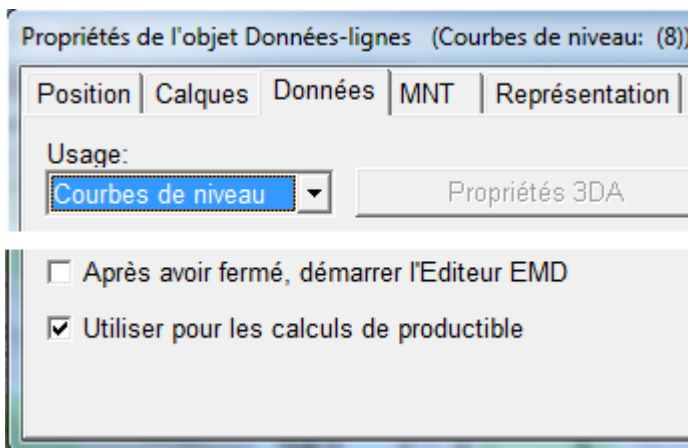
### 3.3.1.4 Objet Données-site. Onglet WAsP: orographie et obstacles



Si vous avez décidé d'utiliser WAsP pour faire les calculs, il faut indiquer, dans l'onglet *Orographie et obstacles (WAsP)*, la *Source des données d'orographie* et les *Objets Obstacles* à utiliser, voir Figure 19.

Figure 19

Si des objets *Données-lignes* et *Maille-altimétrique* sont présents dans le projet, il faut indiquer le type d'objet qui devra être utilisé.



Si vous cochez *Objets dont l'option "Utiliser pour les calculs de productible"* dans le cadre *Source des données d'orographie*, voir Figure 19, les données orographiques contenues dans tous les objets *Données-lignes* ou *Maille-altimétrique* dont l'option *Utiliser pour les calculs de productible* est cochée, voir Figure 20, seront automatiquement utilisés.

Figure 20

Si vous cochez l'option de *Fichier(s) \*.map ou \*.wpo*, voir Figure 19, les données orographiques seront directement extraites des fichiers de courbes de niveau sans avoir à les charger dans un objet *Données-lignes* (voir paragraphe suivant).

Une fois que tous les objets *Obstacle* ont été créés, voir 3.3.1.6, on peut définir le rayon, autour des points de calcul (éoliennes, mâts,...) à l'intérieur duquel les obstacles seront pris en compte, voir Figure 19.

### 3.3.1.5 Objet Données-site. Onglet Fichiers et étendues des données

L'onglet *Fichiers et étendues des données* est présenté à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

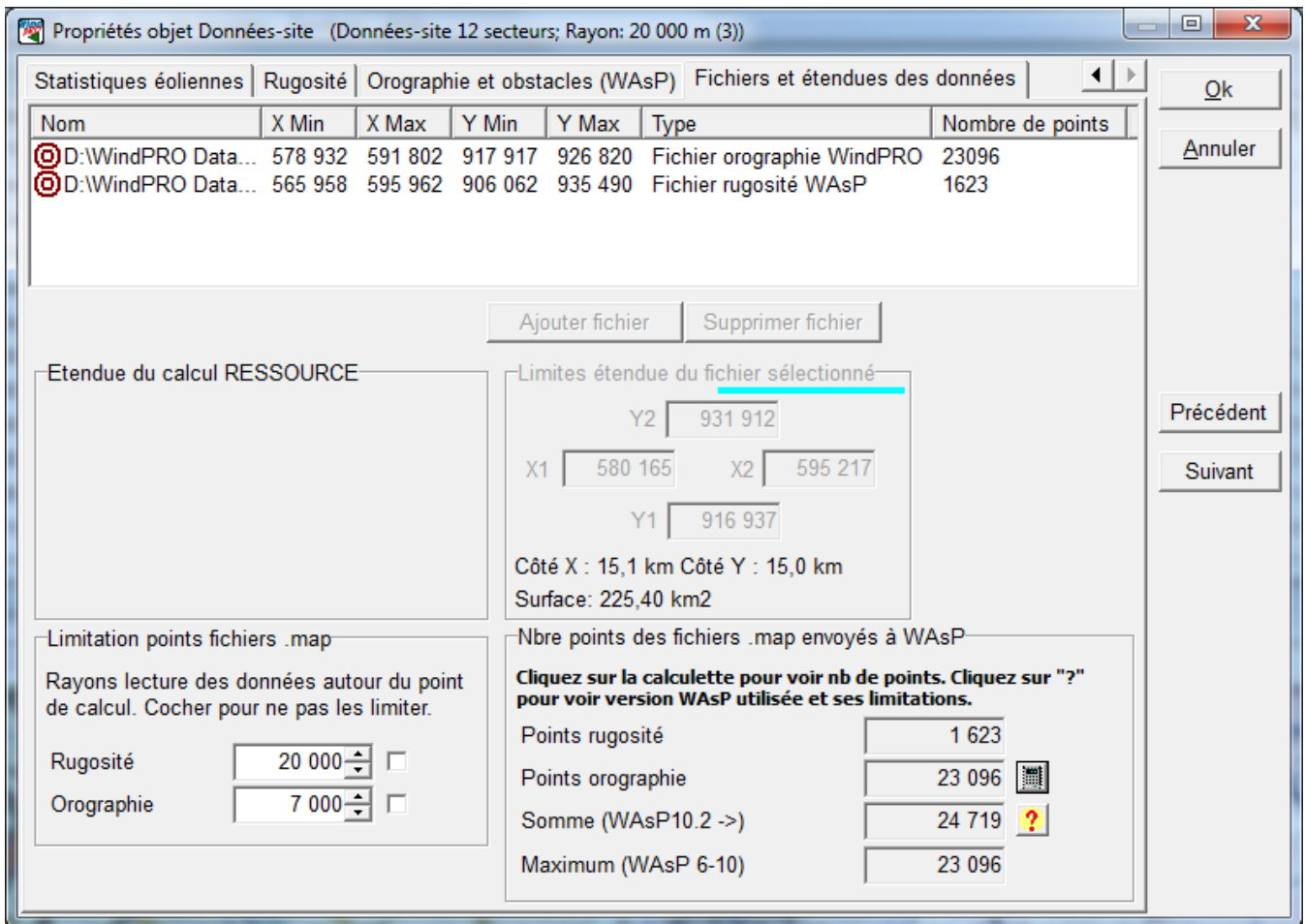


Figure 21

La liste montre tous les fichiers qui seront utilisés dans les calculs. Si des fichiers que vous ne souhaitez pas utiliser apparaissent dans la liste, vérifiez dans les propriétés des objets que l'option *Utiliser pour les calculs de productible* est décochée.

Le cadre *Limites étendue du fichier sélectionné* permet de restreindre les données à utiliser à celles appartenant à un rectangle dont les coordonnées des côtés sont entrées dans les champs X1, X2, Y1 et Y2.

Le cadre *Limitation points fichiers .map* permet de limiter les données utilisées à celle contenues dans les rayons (autour des points de calcul) indiqués dans les champs *Rugosité* et *Orographie* ; c'est une autre manière de limiter les données qui seront utilisées lors des calculs.

Le champ *Nbre points des fichiers envoyés à WAsP* indique la taille (en nombre de points) du plus grand fichier qui sera transmis à WAsP. Connaître ce nombre de points est important car les capacités de WAsP sont limitées. Pressez sur le bouton avec le « ? » pour afficher la fenêtre de la Figure 22, où sont détaillées les limites des différentes versions de WAsP.

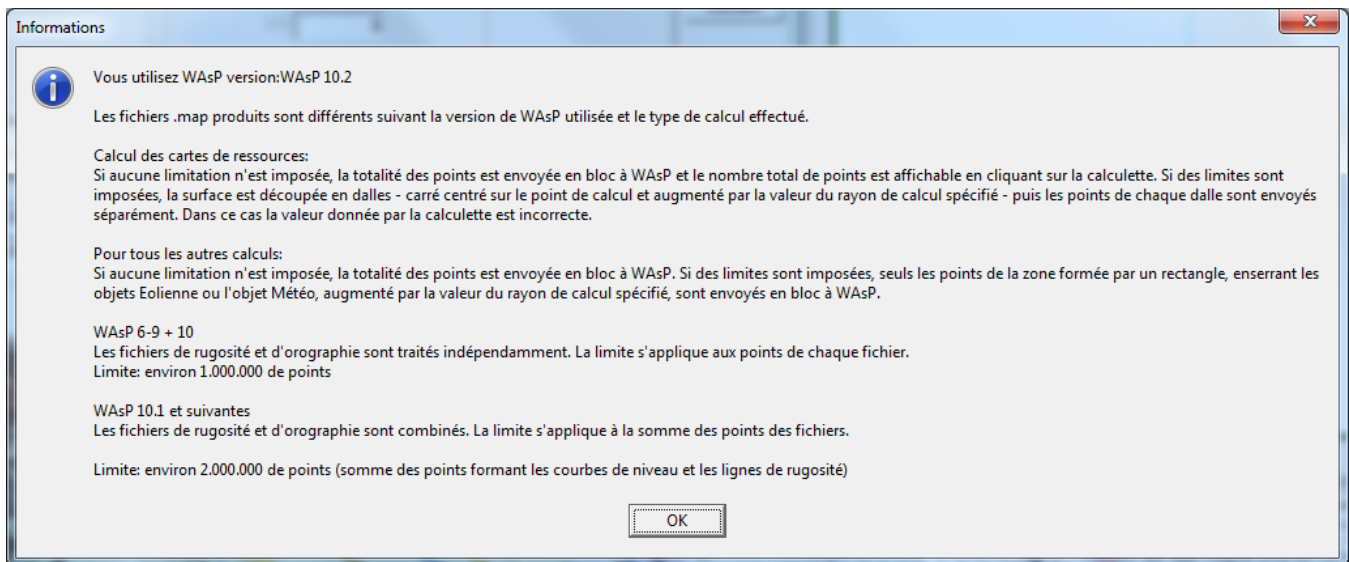


Figure 22



Conjointement à l'onglet *Fichiers et étendues des données*, s'ouvre la fenêtre *Etendue des données* de la Figure 23. Cette fenêtre est très pratique pour s'assurer que les données disponibles couvrent les surfaces nécessaires et pour révéler, dans certains cas, que les systèmes de coordonnées utilisées par les fichiers sont incohérents !

Figure 23

En passant le pointeur de la souris sur >> *Pour plus d'info passer le pointeur ici* << s'ouvre la fenêtre de la Figure 24, où sont données des recommandations sur les étendues minimales des données.

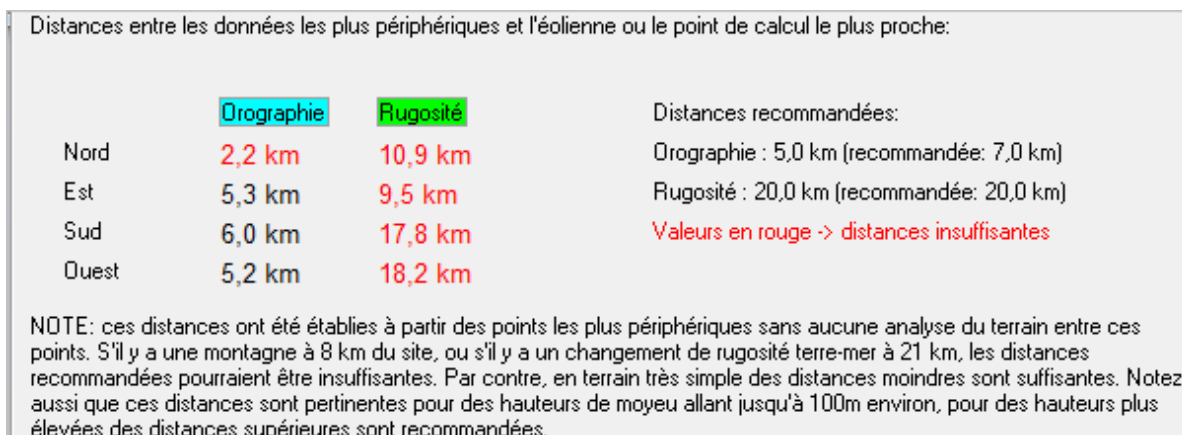


Figure 24



### 3.3.1.6 Entrée des obstacles pour les calculs avec WAsP



L'objet *Obstacle* permet la création d'obstacles au format WAsP. Les obstacles sont entrés graphiquement sur le fond de carte. Les dimensions au sol de l'obstacle peuvent se définir graphiquement en tirant sur les poignées de l'objet avec la souris ou de façon précise dans la fenêtre *Propriétés de l'objet Obstacle*, voir Figure 25.

Après la création de l'objet, la fenêtre de la Figure 25 s'ouvre afin d'introduire les informations de *Hauteur* et de *Porosité* de l'obstacle.

La porosité détermine la quantité de vent que laisse passer l'obstacle. Pour les obstacles dont la porosité varie au cours des saisons de l'année (par ex. les haies à feuilles caduques), il faut donner une porosité annuelle moyenne.

Figure 25



### 3.3.2 Objet Météo : entrée, examen et nettoyage des données de vent

L'objet *Météo* sert à introduire dans WindPRO les données de vent.

Ces données peuvent être très simples :

- Vitesse annuelle moyenne identique dans tous les secteurs à laquelle on associe un paramètre de Weibull  $k = 2$ , entrés manuellement,

ou très élaborées :

- Fichiers issus de mesures avec un SODAR ou un LIDAR comportant 25 hauteurs de mesure couvrant une longue période avec une fréquence d'échantillonnage très élevée.
- Fichiers avec des structures des données et des unités différentes, générés pendant une même campagne de mesures.
- Fichiers compressés .zip.
- Fichiers natifs .RWD issus des stations d'acquisition NRG, mais il faut que l'utilitaire d'extraction NRG soit installé. Cet utilitaire est librement téléchargeable à partir du site <http://www.nrgsystems.com>.  
IMPORTANT : les calibrations chargées sont celles présentes dans la station d'acquisition, or il est courant que les opérateurs négligent d'entrer les bonnes calibrations dans les stations car souvent ils préfèrent entrer les calibrations dans leur PC et utiliser les données brutes des capteurs. L'utilisation directe des fichiers .RWD présente donc le risque d'une extraction incorrecte des données si les paramètres de calibration ne sont pas vérifiés avec l'opérateur.

Le module *Météo* permet de calculer des productibles annuels directement à partir des données de vent sans passer par un modèle d'écoulement, mais la procédure normale est de calculer une *Statistique éolienne* à partir des données contenues dans l'objet et d'utiliser cette statistique pour calculer les productibles annuels avec ATLAS, WAsP-Interface ou (plus communément) avec PARK.

Note : si les données de l'objet *Météo* ne sont pas représentatives du long terme, il convient de les corriger avec MCP (voir section 11) avant de les utiliser pour calculer une *Statistique éolienne*.

Les fichiers natifs issus d'une station d'acquisition ne sont pas toujours utilisables directement, il faut alors les convertir au format ASCII (.txt ou .csv) à l'aide de l'utilitaire fourni avec la station.

#### 3.3.2.0 Compatibilité avec les versions 2.5 et antérieures

Après la version 2.5, l'objet *Météo* a été profondément modifié. Ces modifications concernent également l'organisation des données, et par conséquent, on ne peut pas utiliser avec WindPRO2.5 des données de vent enregistrées avec des versions ultérieures. Par contre, le contraire est possible.

Les principales différences avec l'objet de la v2.5 sont les suivantes :

- La possibilité d'importer les données relatives à toutes les hauteurs de mesure présentes dans un fichier en une seule opération,
- Le nombre de grandeurs visualisables sur un même graphique est illimité,
- Il n'y a plus de cloisonnement dans la manipulation des données relatives aux différentes hauteurs de mesure,
- Le filtrage des données à utiliser peut se faire en une seule opération pour l'ensemble des hauteurs de mesure,
- L'enrichissement des statistiques sur les données,
- L'automatisation totale du téléchargement des données à partir du service *Données-Online*.

TRÈS IMPORTANT lors du re-calcul de projets en version 2.5 et antérieures :

Maintenant, il y a une liaison permanente entre les données en séries temporelles et leurs conversions en tableau des fréquences et en paramètres de Weibull. Ainsi, un changement dans les données en séries temporelles sera AUTOMATIQUÉMENT répercuté dans le tableau des fréquences et dans les paramètres de Weibull.

Si vous avez modifié manuellement le tableau des fréquences et/ou les paramètres de Weibull dans votre projet en v2.5, ces modifications ne seront pas conservées et un message d'alerte s'affichera lors du premier chargement.

**Solution :** si vous souhaitez conserver ces modifications, il faut copier le tableau des fréquences et/ou les paramètres de Weibull dans une feuille Excel, créer un nouvel objet *Météo* et entrer les données sous forme de tableau des fréquences et/ou de paramètres de Weibull en les collant à partir de la feuille Excel et ne pas utiliser les données sous leur forme de séries temporelles.

### 3.3.2.1 Onglet Guide

La création d'un objet *Météo* est suivie de l'ouverture automatique de l'onglet *Guide* de la fenêtre *Propriétés de l'objet*, voir Figure 26.

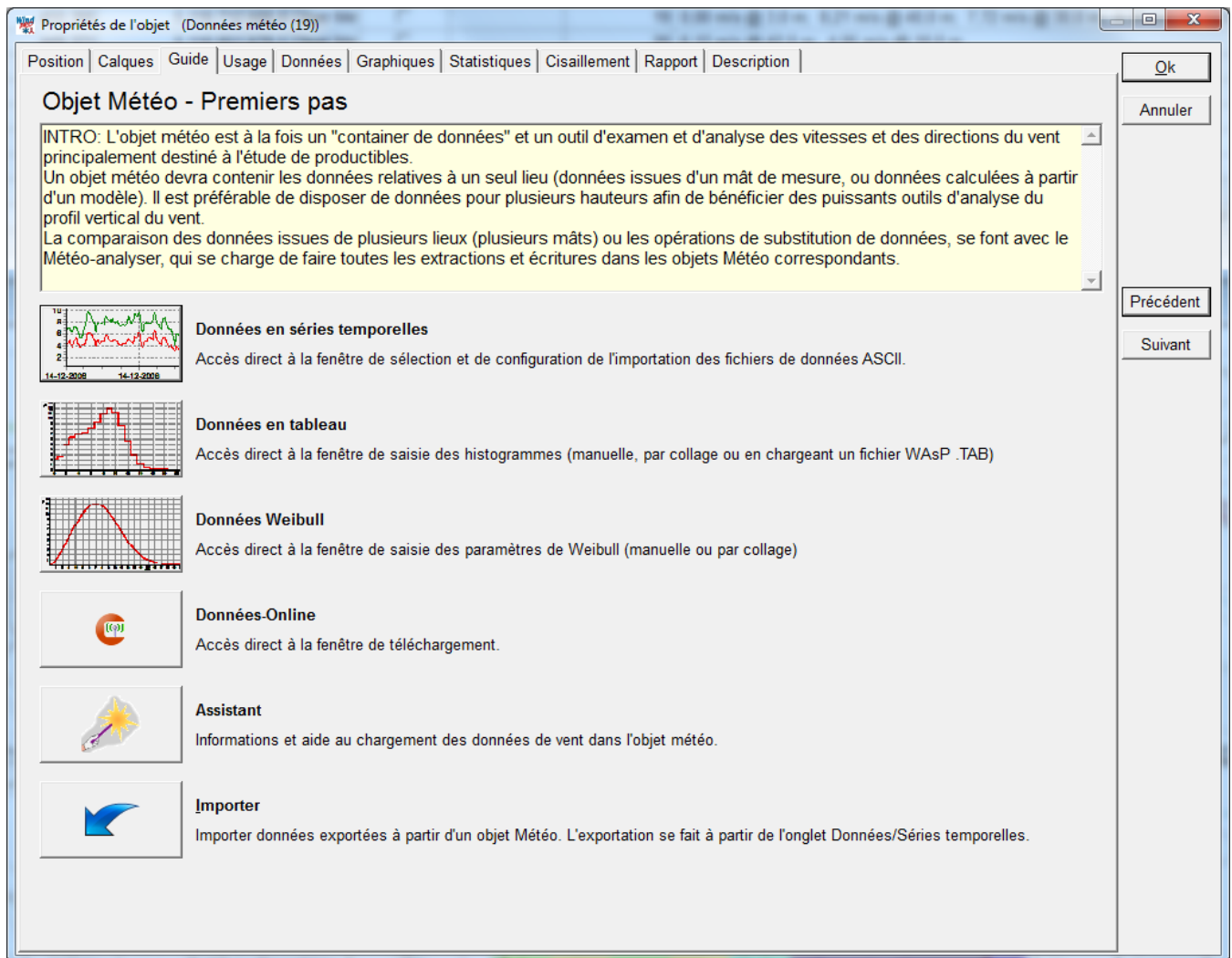


Figure 26

En général des *Données en séries temporelles* sont utilisées. En cas de doute, cliquez sur le bouton *Assistant* pour être guidé.

Le bouton *Données-Online* permet de télécharger automatiquement dans l'objet *Météo*, à partir du serveur EMD, des données de vent gratuites pour la plupart et payantes pour certaines.

Les sources de données de vent sont enrichies progressivement, toutes les sources disposant de données utilisables à l'endroit de votre projet sont présentées lors du lancement de la procédure de téléchargement.

Si vous revenez à l'onglet *Guide* après un téléchargement, le bouton *Données-Online* change et devient *Rafraîchir les Données-Online*.

Un clic sur le bouton *Données-Online* ouvre la fenêtre de *Sélection des données à télécharger*, voir Figure 27, où sont listées toutes les sources de données proposées par le service *Données-online* :

- NCAR, NARR (USA uniquement), MERRA et CFSR sont des données issues de modèles dont la résolution varie de 6 heures/2,5° pour NCAR à 1 heure/0,66° pour MERRA.
- QSAT and Blended Coastal Winds sont des données offshore issues de mesures scatterométriques.
- METAR et SYNOP sont des données issues, respectivement, des aéroports et de stations de services météorologiques, relevées généralement à 10m de hauteur et dont la résolution est très variable d'un lieu à l'autre.
- EMD-ConWx sont des données haute résolution (1 heure/3 km) issues d'un modèle meso-échelle qui couvrent l'Europe seulement. Ces données sont payantes.

Les données sont mises à jour tous les mois excepté pour QSCAT dont la collecte s'est arrêté en 2009. La plus plupart des sources couvrent les 30 dernières années.

Pour des informations détaillées voir : <http://help.emd.dk/WindPRO/content/ReferenceManual/OnlineData.pdf>

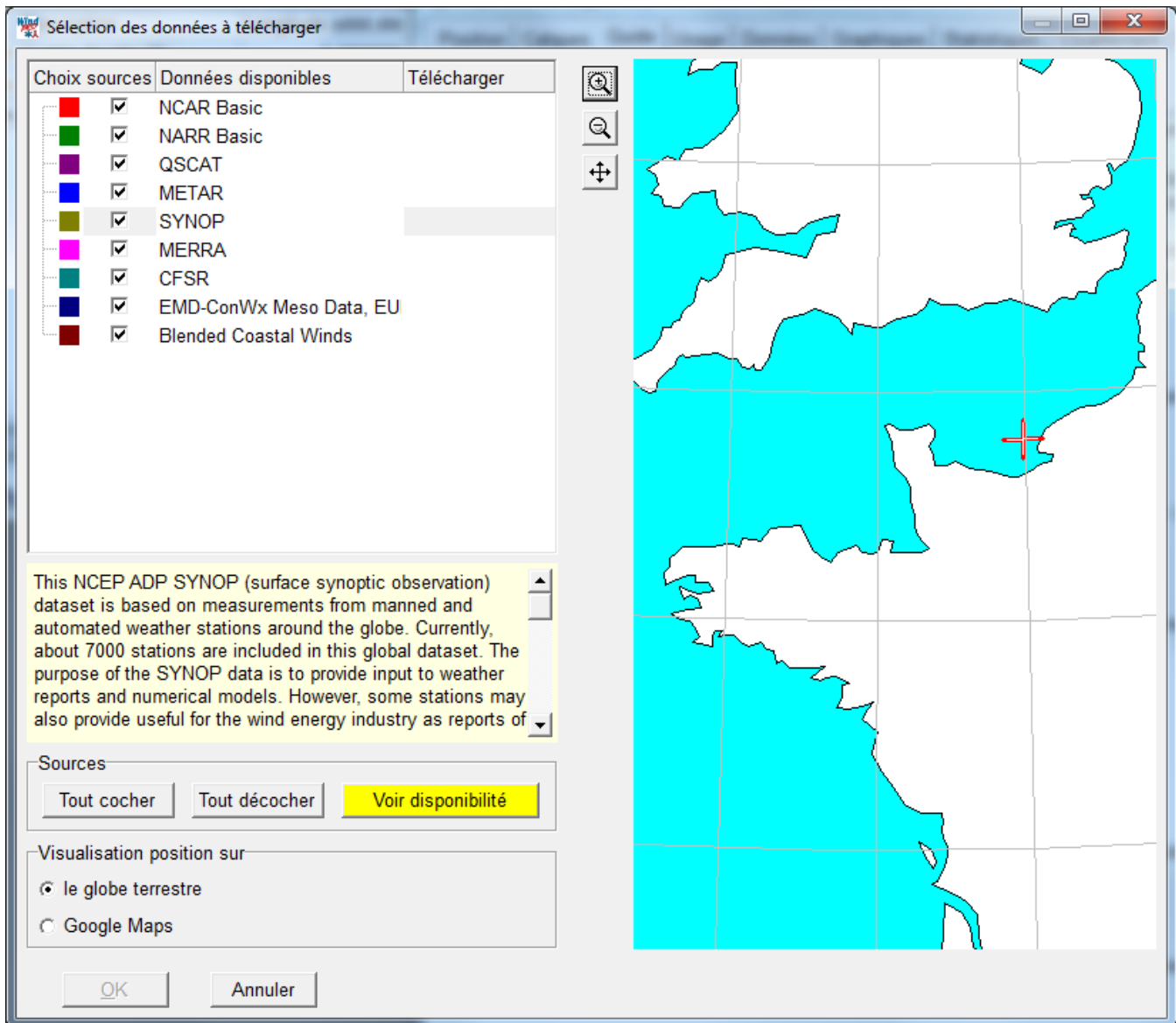


Figure 27

En cliquant sur le bouton *Voir disponibilité*, on lance la recherche, dans toutes les sources cochées, de données à proximité du site étudié.

Les données trouvées sont listées dans la colonne *Données disponibles* et localisées sur la carte par des points colorés. Leur visualisation peut se faire également sur Google Maps si on est connecté à Internet, voir Figure 28.

Pour choisir les données à télécharger, il suffit de cliquer leur point sur la carte ou de cocher leurs coordonnées dans la colonne *Télécharger* puis de cliquer sur le bouton *OK*, voir Figure 28. Les données sont alors automatiquement chargées dans un objet Météo.

Note : plusieurs jeux de données simultanément à l'aide du *Météo-analyser*.

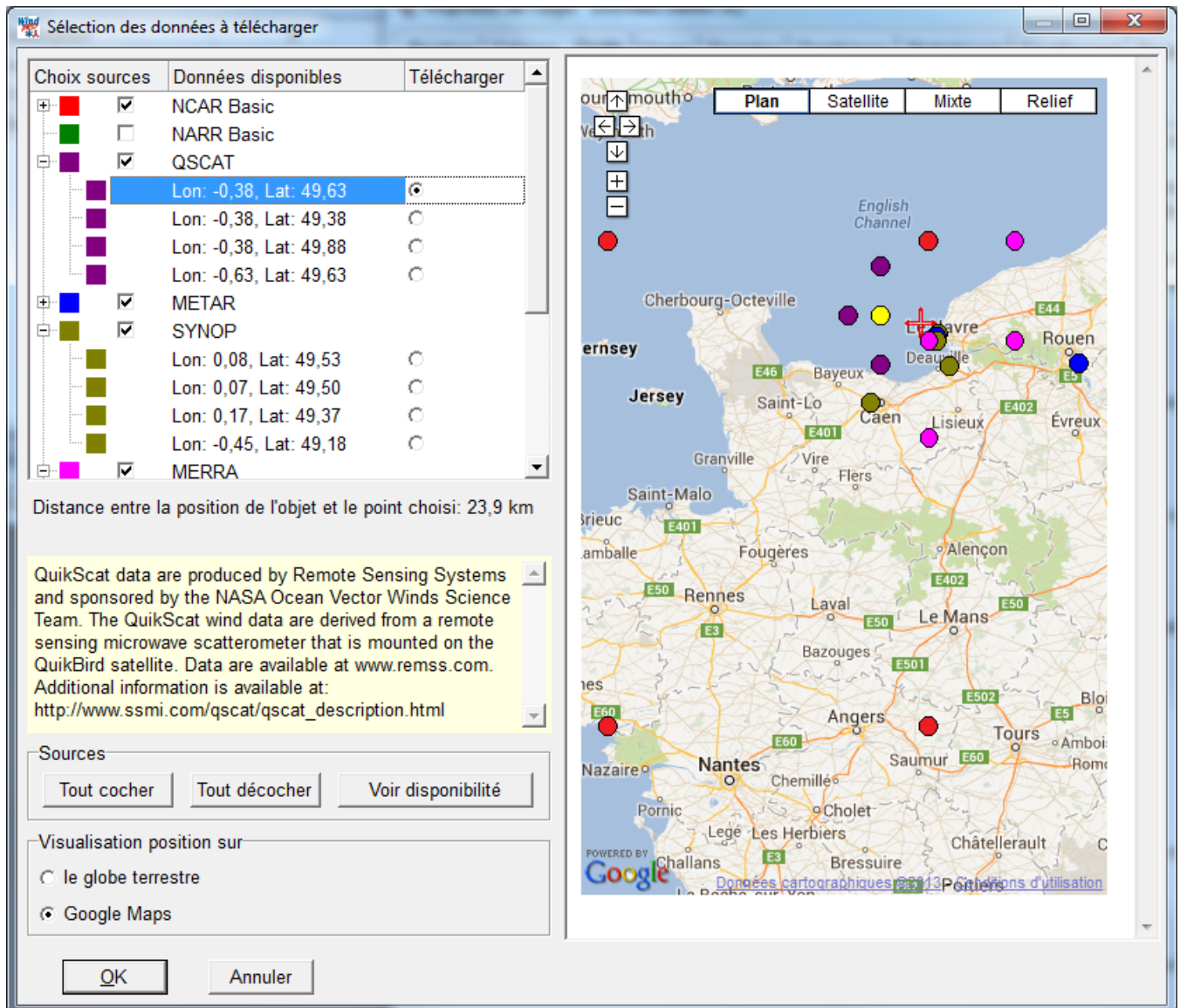


Figure 28

### 3.3.2.2 Onglet Usage

La Figure 29 montre l'onglet *Usage*. Dans cet onglet vous pouvez préciser l'usage qui sera fait des données. Ainsi, lorsque WindPRO vous demandera de choisir les données de vent à utiliser, il ne vous proposera que les données pertinentes en fonction du contexte de travail. Cette possibilité est très pratique lorsque votre projet comporte de nombreuses mesures de vent.

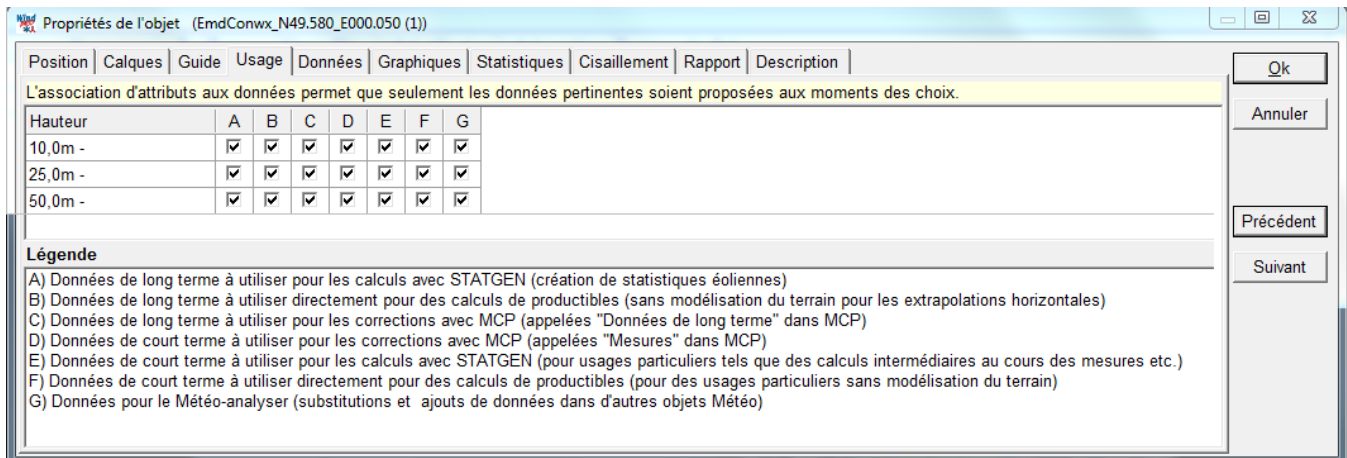


Figure 29

### 3.3.2.3 Onglet Données

L'onglet *Données* est présenté à la Figure 30.

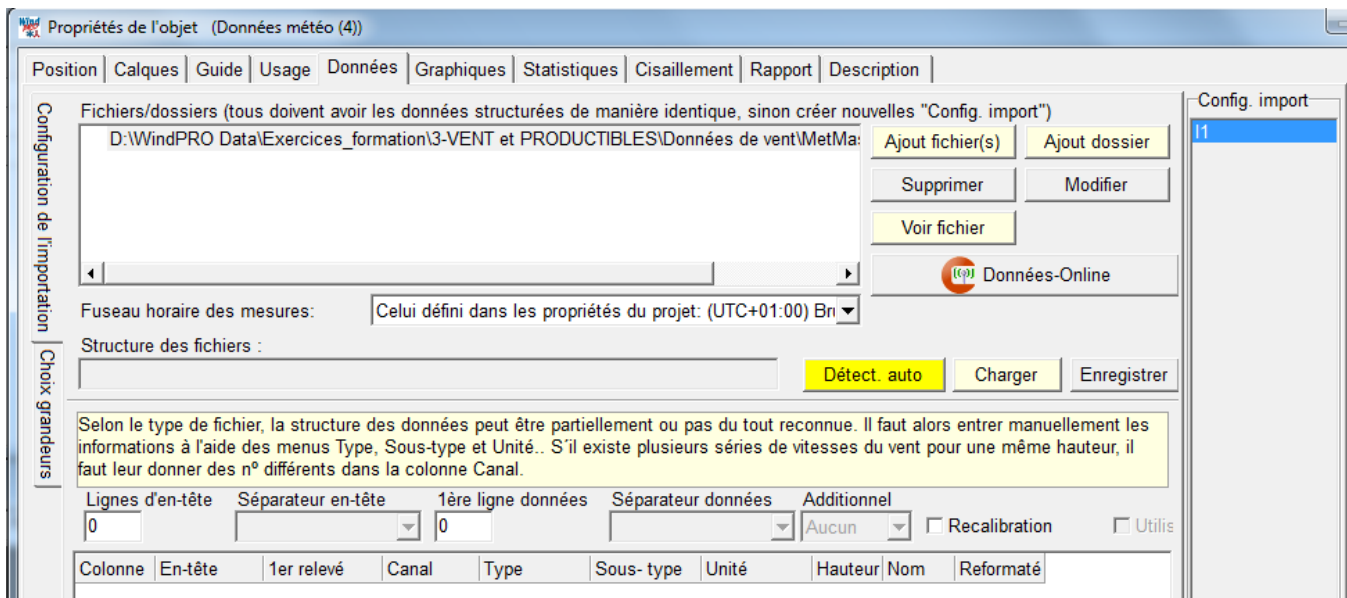


Figure 30



Dans cet onglet se font les opérations suivantes :

La préparation de l'importation des données :

- La *Configuration de l'Importation* (sélection des fichiers de données et description de la structure de leurs données),
- *Le Choix des Grandeurs* à importer (par hauteur de mesure).

Le chargement des données à partir des fichiers sélectionnées et leur traitement :

- Chargement des *Séries temporelle* dans un tableau,
- Description des données sous forme de tableau des *Fréquences* par classe de vent,
- Description des données par des distributions de *Weibull*,
- Extraction des intensités des *Turbulences*.

A ces opérations sont associés les sous-onglets décrits à la suite :

### Sous-onglet *Importation*

Important : seuls les fichiers au format ASCII sont utilisables. Par conséquent, les fichiers bruts des stations d'acquisition, les fichiers Excel, etc. doivent être convertis en fichiers texte. Les fichiers texte compressés (\*.zip et autres) sont acceptés.

- Le bouton **Ajout fichier(s)** ouvre la fenêtre Windows permettant de sélectionner le(s) fichier(s) contenant les données à charger. Remarque : plusieurs fichiers peuvent être sélectionnés à condition que la structure de leurs données soit identique. Si ce n'est pas le cas, il faut créer une configuration d'importation par type de structure en cliquant sur le bouton *Ajouter* dans le bandeau *Config. d'import*.
- Le bouton **Ajout dossier** ouvre la fenêtre de la Figure 31 qui permet de sélectionner directement le dossier contenant les fichiers à condition que la structure de leurs données soit identique. Si après le chargement, d'autres fichiers sont ajoutés dans le dossier, il suffit de cliquer sur le bouton *Charger nouv.* dans le sous-onglet *Choix grandeurs* (présenté dans les lignes qui suivent), pour actualiser les données dans l'objet *Météo*. Si le dossier contient des fichiers issus de différents mâts de mesures ou des fichiers sans rapport avec les données de vent, il est possible de les discriminer en utilisant le champ *Filtre*.

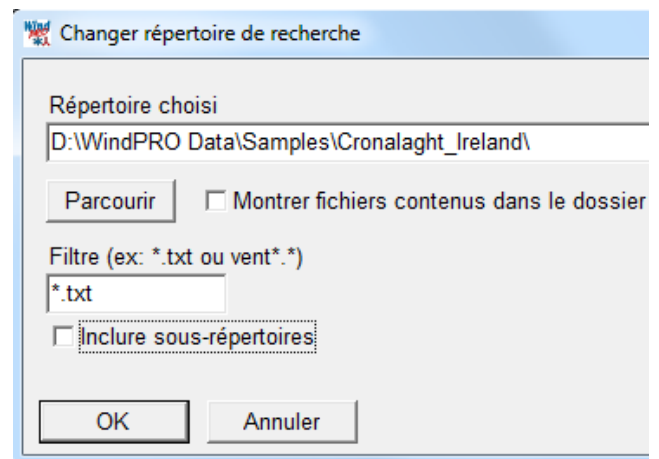


Figure 31

- Le bouton **Supprimer** permet de désélectionner un fichier présent dans la liste *Fichiers/dossiers*.
- Le bouton **Modifier** permet d'indiquer le nouvel emplacement d'un fichier s'il a été déplacé.
- Le bouton **Données-Online** lance une connexion avec le serveur EMD et montre les données de vent disponibles et téléchargeables pour la région du projet, voir 3.3.2.1. L'accès à ce service requiert une licence pour le module MCP/Statgen.
- Dans le menu **Fuseau horaire**, il faut indiquer le fuseau d'horodatage des données. La connaissance du fuseau est nécessaire pour transformer l'horodatage UTC (appelé aussi GMT) de données globales comme celle du NCAR en horodatage en heure locale. Il est possible d'appliquer des corrections d'horodatage spécifiquement par hauteur de mesure. Ceci est nécessaire, par exemple, pour corriger les données NCAR à 10m de hauteur dont les valeurs sont des prévisions à GMT+6 heures alors que pour les autres hauteurs c'est un horodatage GMT qui est utilisé. Cette correction se fait dans le champ *Décalage de l'horodatage [mn]* du sous-onglet *Choix grandeurs*.

Partie **Structure des fichiers**. Si la structure des données n'est pas reconnue automatiquement, c'est dans cette partie de la fenêtre qu'elle doit être décrite manuellement ou en utilisant un fichier.

- Le bouton **Délect. auto** permet de lancer la reconnaissance automatique de la structure des données contenues dans les fichiers. Dans le cas de la Figure 32 la structure a été reconnue et WindPRO indique qu'il s'agit d'un fichier provenant d'une station d'acquisition NRG Symphonie™.
- Boutons **Enregistrer** et **Charger**. **Enregistrer** permet d'enregistrer, dans un fichier \*.wls, une structure, qui n'a pas été reconnue et qui a dû être décrite manuellement. **Charger** permet d'appliquer la structure décrite dans un fichier \*.wls.
- **Recalibration** : si on se rend compte que la calibration d'un capteur entrée dans la station d'acquisition est incorrecte, cette option permet de faire la correction.
- **Lancer Texte->nbre** lance un utilitaire permettant la conversion d'une chaîne de texte en un nombre. Elle permet, par exemple, de convertir les directions exprimées par N, NNE, ENE,... en 0°, 30°, 60°,...

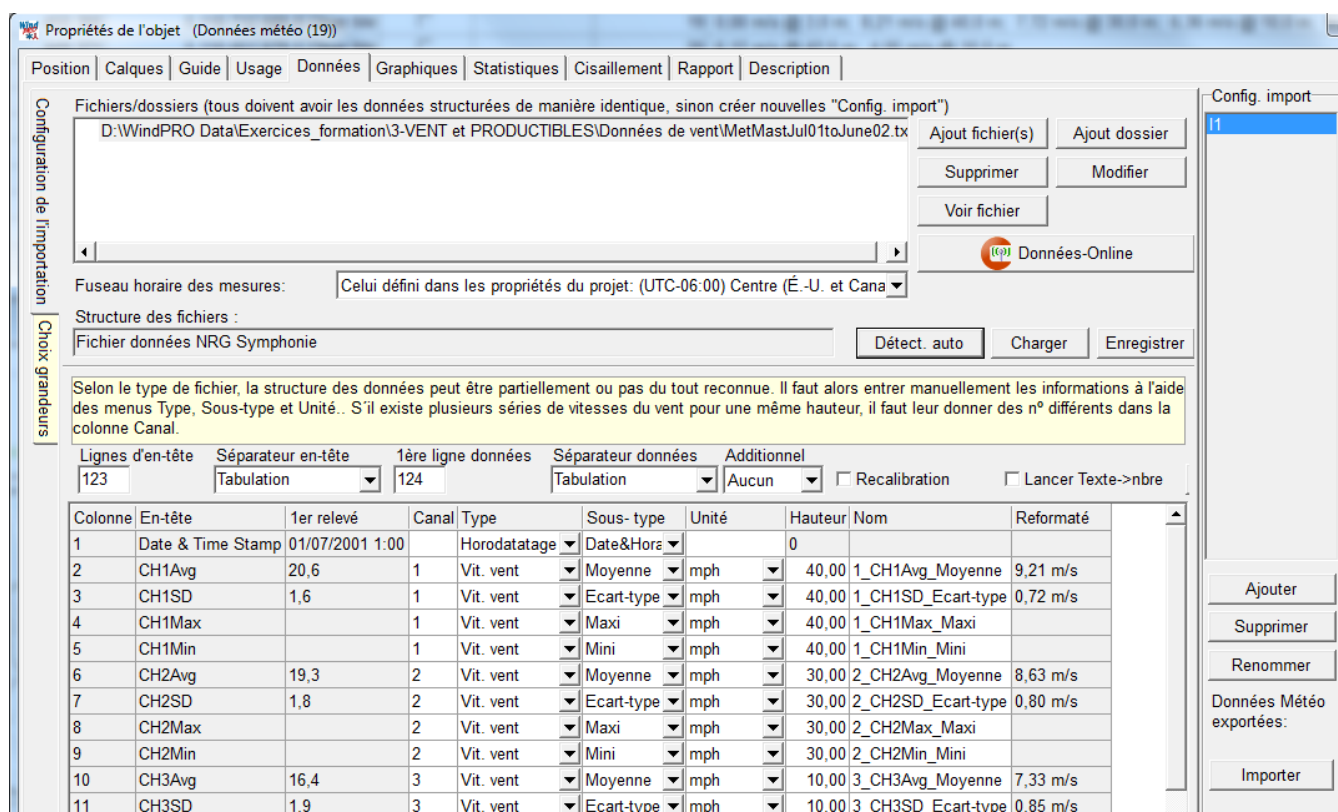


Figure 32

Si la structure n'est pas reconnue, ou seulement partiellement reconnue, il faudra compléter la description manuellement à l'aide des menus déroulants suivants :

- Menu **Type** : dans ce menu doit être indiqué la nature des grandeurs trouvées dans les différentes colonnes des données c.à.d. *Horodatage*, *Vitesse*, *Direction*, etc., ou *Ignorer* si la colonne ne doit pas être prise en compte,
- Menu **Sous-type** : ce menu permet de préciser la nature de la grandeur. Par exemple, si la grandeur est une vitesse on peut préciser s'il s'agit d'une vitesse *Moyenne*, *Mini*, *Maxi*, etc.,
- Menu **Unité** : dans ce menu doit être indiquée l'unité de mesure utilisée. Notez que les vitesses sont converties en m/s.

Concernant l'horodatage le champ **Unité** permet de décrire sa structure, dans le cas de la Figure 32, il faut entrer d-m-y h:m:s pour indiquer que la chaîne représente jour-mois-année heure:minute:seconde.

- Champ **Hauteur** : dans ce champ doit être indiquée la hauteur de mesure en mètres. Par exemple, si dans le paramétrage d'une station d'acquisition NRG Symphonie™, il est indiqué que les hauteurs sont en pieds, WindPRO va les convertir automatiquement en mètres. Il faut TOUJOURS vérifier que les hauteurs sont correctes car il peut y avoir des erreurs dans le paramétrage de la station d'acquisition.

Quand la description de la structure des données est terminée il faut passer au sous-onglet *Choix grandeurs*.

### Sous-onglet *Choix grandeurs*

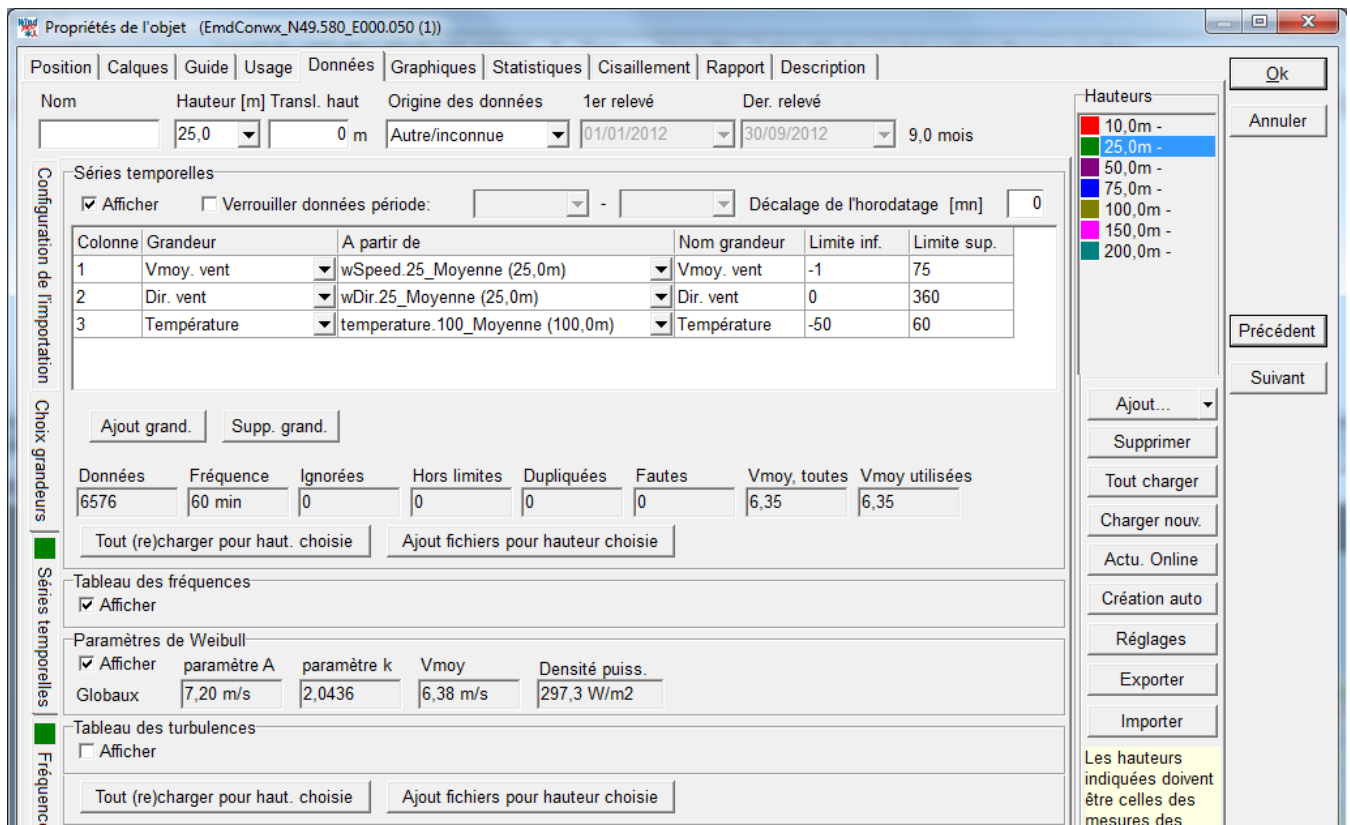
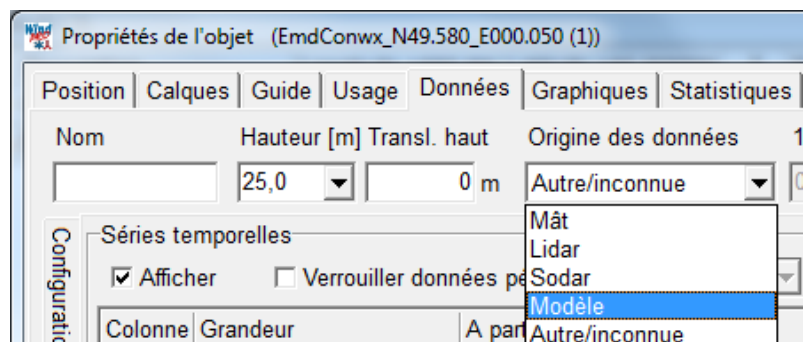


Figure 33

- Le bouton **Création auto** (en surbrillance jaune après la *Configuration de l'importation*) fait apparaître dans le cadre *Séries temporelles* la proposition de WindPRO des *Grandeurs* à charger dans l'objet *Météo*. En général, WindPRO propose pour chaque *Hauteur* de mesure de la vitesse du vent :
  - la vitesse du vent
  - la direction du vent
  - les intensités de la turbulence
 Si à la hauteur de la mesure de la vitesse du vent considérée il n'y pas de données relatives à la direction du vent, WindPRO utilise celles de la hauteur la plus proche.

- Le champ **Transl. haut** permet de traiter des situations spécifiques : mât placé dans une forêt (translation > 0) ou sur relief de très petite étendue (translation négative).
- Le menu *Origine des données* peut servir avec le module *Qualification des sites*.



- Les boutons **Ajout grand.** et **Supp. Grand.** permettent d'ajouter des grandeurs à la liste proposée par WindPRO (comme la *Température* ou la vitesse *Maxi* du vent si elles sont présentes dans l'importation) ou de supprimer des grandeurs de cette même liste.
- Les boutons **Tout (re)charger pour haut. choisie** et **Ajout fichiers pour la hauteur choisie** permettent de (re)charger toutes données pour la hauteur choisie ou uniquement celles des fichiers ajoutés depuis la précédente opération d'importation.

Fonctions des boutons du bandeau à droite de la fenêtre :

- Le bouton **Ajout...** permet l'ajout :
  - d'une *Hauteur* de mesure supplémentaire
  - d'une *Combinaison de données*, typiquement utilisée pour supprimer les effets des sillages d'un mât de mesure en combinant les données de deux anémomètres.
  - de *Données artificielles* qui permet l'extrapolation des mesures à d'autres hauteurs à partir du calcul d'une matrice des cisaillements, un exemple est donné dans la suite.
- Le bouton **Supprimer** permet de supprimer une *Hauteur* de mesure de la vitesse du vent.
- Les boutons **Tout charger** et **Charger nouv.** permettent de charger toutes données pour toutes les *Hauteurs* ou uniquement celles des fichiers ajoutés depuis la précédente opération d'importation.
- Le bouton **Actu. Online** permet de mettre à jour les données téléchargées à partir de *Données-Online* en ajoutant les données le plus récentes.
- Le bouton **Réglages** ouvre une fenêtre permettant d'établir des règles définissant le synchronisme des données, le calcul des turbulences et des cisaillements, et aussi de signaler l'utilisation de données de très haute résolution.
- Le bouton **Exporter** permet d'exporter dans un simple fichier texte les données des *Hauteurs* choisies. La Figure 34, montre un exemple d'exportation des données à 80m et à 60m. Lors du chargement WindPRO fait un « marquage » des données en leur associant des attributs : *Ignorées, Hors limites, Dupliquées, etc.*, voir sous-onglet *Séries temporelles*. Ces marques sont également exportées. A cet effet, le codage défini par les *StatusValues* est utilisé. Dans les colonnes *DataStatus* sont reportés la somme des codes des attributs (*StatusValues*) concernant chaque donnée. Le codage utilisé fait qu'à partir de la somme des codes on peut retrouver les différents attributs associés à chaque donnée, voir Figure 34. Les en-têtes sont exportées en format texte Unicode (UID) et apparaîtront de manière identique quelque soit la langue de WindPRO. Pour les grandes entreprises, ceci permet de créer une base de données, ayant un format unique, construite à partir des données exportées par des utilisateurs du monde entier et utilisables par des utilisateurs du monde entier également.
- Le bouton **Importer** permet d'importer les données exportées avec le bouton *Exporter*. Le bouton *Importer* de l'onglet *Guide* a la même fonction.  
Note : l'objet *Météo* lui-même peut être exporté et importé à partir du menu contextuel de la fenêtre *Objets*.

Geographical Coord	Longitude:	-87,22	Latitude:	13,9											
Local Coordinates:	( Longitude:	475798	Latitude:	1536185											
Description:		4108													
User label:															
StatusValues:															
Ok		0													
Disabled		1													
Below limit		2													
Above limit		4													
Duplicate		8													
Null value		16													
Missing		32													
Other error		128													
Note that SampleStatus takes precedence over DataStatus which means that DataStatus is only relevant if SampleStatus is OK.															
TimeStamp_80,0m	MeanWindSpeedUID_80,0m	DirectionUID_80,0m	TurbIntUID_80,0m	Comment_80,0m	TimeStampStatus_80,0m	SampleStatus_80,0m	DataStatus_MeanWindSpeedUID_80,0m	DataStatus_DirectionUID_80,0m	DataStatus_TurbIntUID_80,0m	TimeStamp_60,0m	MeanWindSpeedUID_60,0m	DirectionUID_60,0m	TurbIntUID_60,0m		
	[m/s]	[Degrees]									[m/s]	[Degrees]			
11-06-2008 13:10	4,4	53	0,0682		0	0	0	0	0	11-06-2008 13:10	4,3	53	0,0698		
11-06-2008 13:20	4	56	0,15		0	0	0	0	0	11-06-2008 13:20	3,7	56	0,1622		
11-06-2008 13:30	4,3	57	0,2326		0	0	0	0	0	11-06-2008 13:30	4,1	57	0,2195		
11-06-2008 13:40	4,7	55	0,1702		0	0	0	0	0	11-06-2008 13:40	4,6	55	0,1739		
11-06-2008 13:50	4,2	48	0,2143		0	0	0	0	0	11-06-2008 13:50	4,1	48	0,2439		

Figure 34

Options se trouvant dans la partie supérieure du cadre *Séries temporelles* :

- L'option **Afficher** permet de masquer le contenu du cadre *Séries temporelles* et de supprimer le sous-onglet *Séries temporelles*, dans le cas où vous n'utilisez pas ce type de données.
- Option **Verrouiller données période** : l'intervalle [dd/mm/yyyy – dd/mm/yyyy] permet, lors d'un rechargement des données, de ne pas écraser les données existantes dans l'intervalle défini. Cette option est utile, par exemple, pour protéger les séries de données quand le fichier source n'est plus présent dans le PC ou quand les séries résultent de la combinaison, réalisée avec WP2.5, de plusieurs fichiers ayant des structures différentes.  
Normalement un rechargement nécessite l'ensemble des tous les fichiers sources et la description de la structure des données excepté si cette option est activée.
- Les champs **Limite inf.** et **Limite sup.** permettent de « marquer » les données hors des limites définies dans ces champs. Note : par défaut la *Limite inf.* de la *Vmoy. vent* est à « -1 » car parfois les calibrations entrées dans les stations d'acquisition peuvent donner des valeurs négatives pour les vitesses de vent nulles ou très faibles.  
Si la vitesse = 0,00 m/s est absente le calcul des distributions de Weibull sera incorrect et les calculs utilisant ces distributions seront faussés.



### Suppression des effets des sillages du mât

Un clic sur le bouton *Ajout...Combinaison de données* ouvre la fenêtre de la Figure 35 qui permet de paramétrer la manière de combiner les données issues de deux séries temporelles.

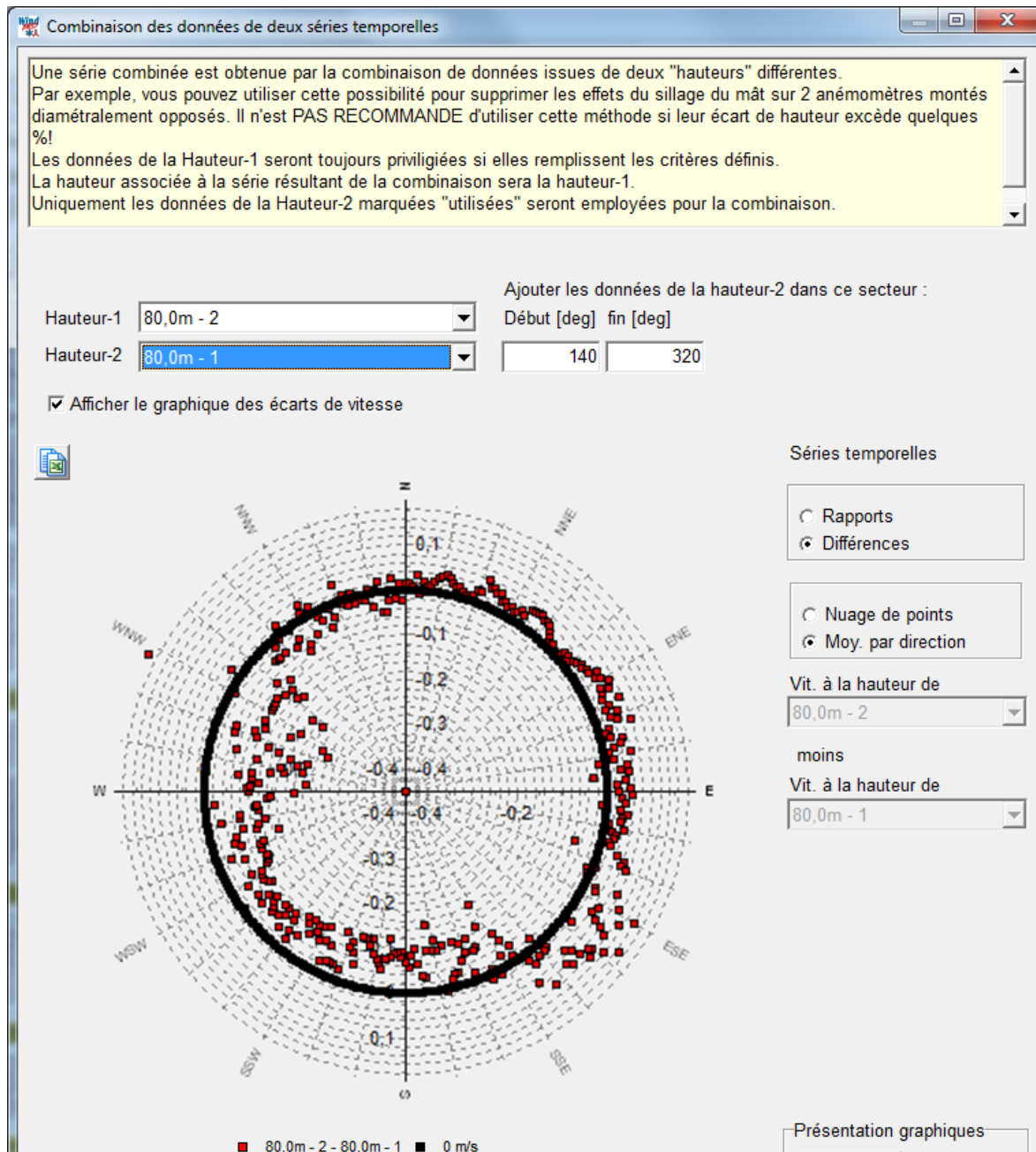


Figure 35

Quand on dispose de deux anémomètres montés diamétralement opposés et à la même hauteur, il est possible avec la *Combinaison de données* de supprimer les effets du sillage du mât en substituant dans un anémomètre les données dans le secteur affecté par le sillage par celles de l'autre anémomètre appartenant au même secteur. Dans l'exemple de la Figure 35, on constate que les valeurs mesurées par l'anémomètre 2 sont inférieures à celle mesurées par l'anémomètre 1 (on rencontre souvent des effets plus marqués que ceux de cet exemple car dans le cas présent les anémomètres sont probablement placés au sommet du mât).

Un clic sur *Ok* ouvre la fenêtre de la Figure 36 dans laquelle on peut modifier le paramétrage de la combinaison en cliquant sur les boutons avec 3 points situés droite des *Critères d'application de la combinaison*. Un clic sur le bouton *Tout (re)charger pour haut. choisie* génère la nouvelle série résultant de la combinaison.

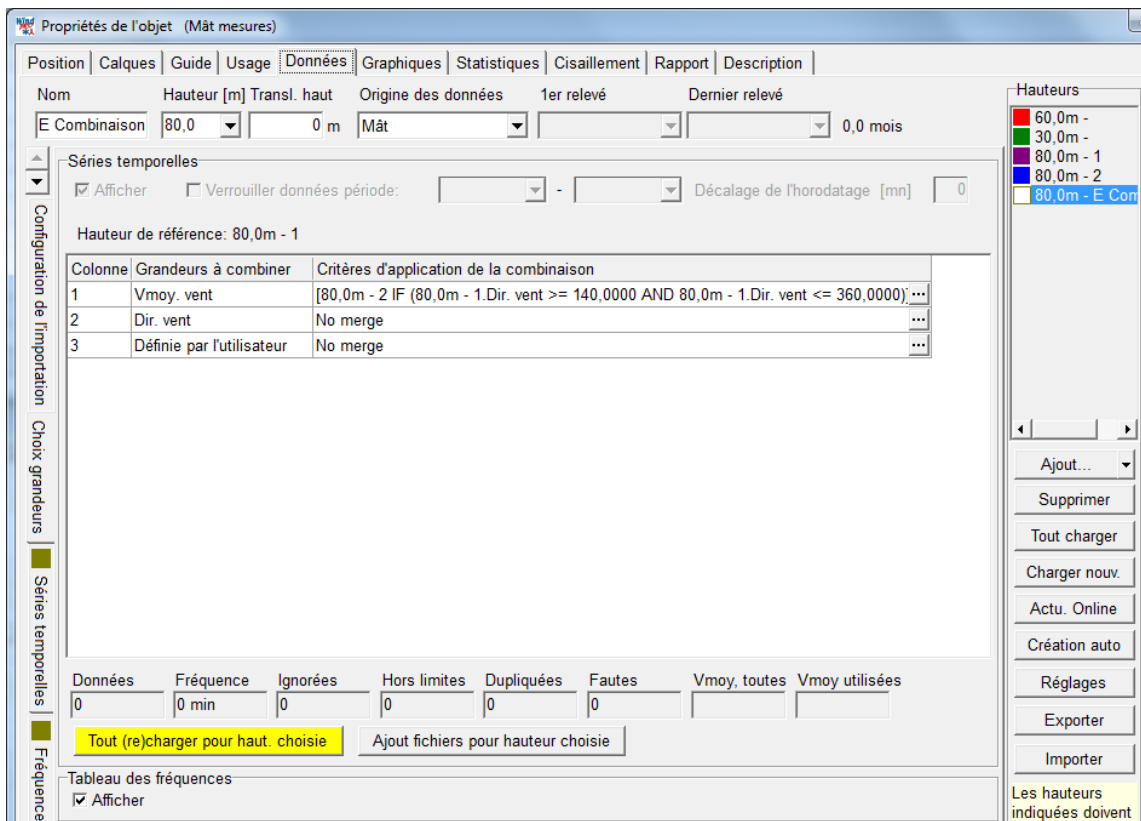


Figure 36

### Extrapolation des mesures à d'autres hauteurs à partir d'une matrice des cisaillements

Si on dispose de mesures effectuées à deux hauteurs ou plus, on peut extrapoler les mesures à une autre hauteur à partir d'une matrice des cisaillements. La matrice peut être plus ou moins détaillée en fonction des données disponibles, voir Figure 37.

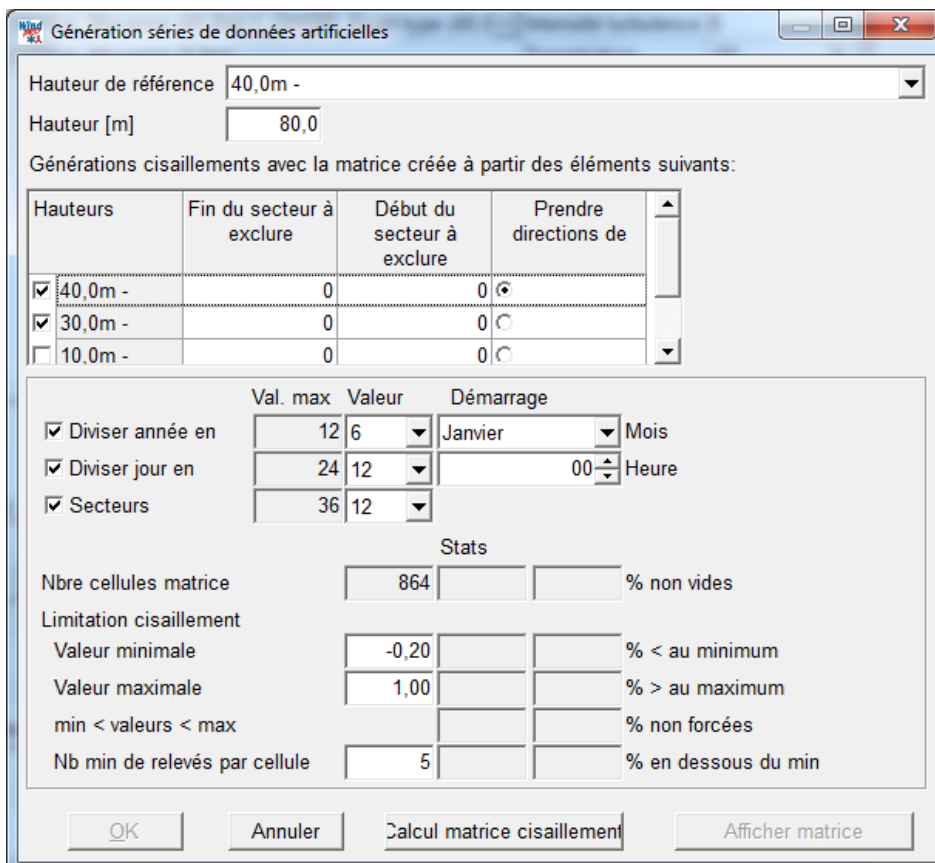


Figure 37

Les cisaillements sont calculés par classe de vitesse du vent pour les mois, les périodes du jour et les directions définis dans la fenêtre de paramétrage de la Figure 37, ils rendent partiellement compte des conditions de stabilité atmosphérique, voir Figure 38. Quand le soleil chauffe la surface du sol, les masses d'air se mettent en mouvement et les valeurs de cisaillement sont plus faibles. L'extrapolation à la hauteur demandée se fait individuellement pour chaque classe de vitesse à partir de la matrice.

Note : en terrain non plat ou en forêt les extrapolations ainsi calculées peut être totalement erronées, dans ces cas il convient de modéliser l'écoulement avec WASP ou avec WASP-CFD quand le relief est très complexe.

Si le nombre de relevés pour un triplet (classe de vitesse, période du jour, direction) est inférieur au nombre mini défini, la valeur de cisaillement suivante lui sera attribuée :

- 1) La valeur annuelle de la période du jour et de la direction, ou si non disponible
- 2) La valeur moyenne des deux directions adjacentes, ou si non disponible
- 3) La valeur moyenne globale.

Les valeurs de substitution sont de plus en plus incertaines mais ce n'est pas critique elles sont appliquées à des situations de moins en moins fréquentes.



Figure 38

La nouvelle hauteur apparaît dans le cadre *Hauteurs*, voir Figure 39. Pour effectuer l'extrapolation en utilisant la matrice il faut, ensuite, cliquer sur le bouton *Tout (re)charger pour la haut. choisie*.

Le bouton *Modifier* permet de revenir au paramétrage de la matrice.

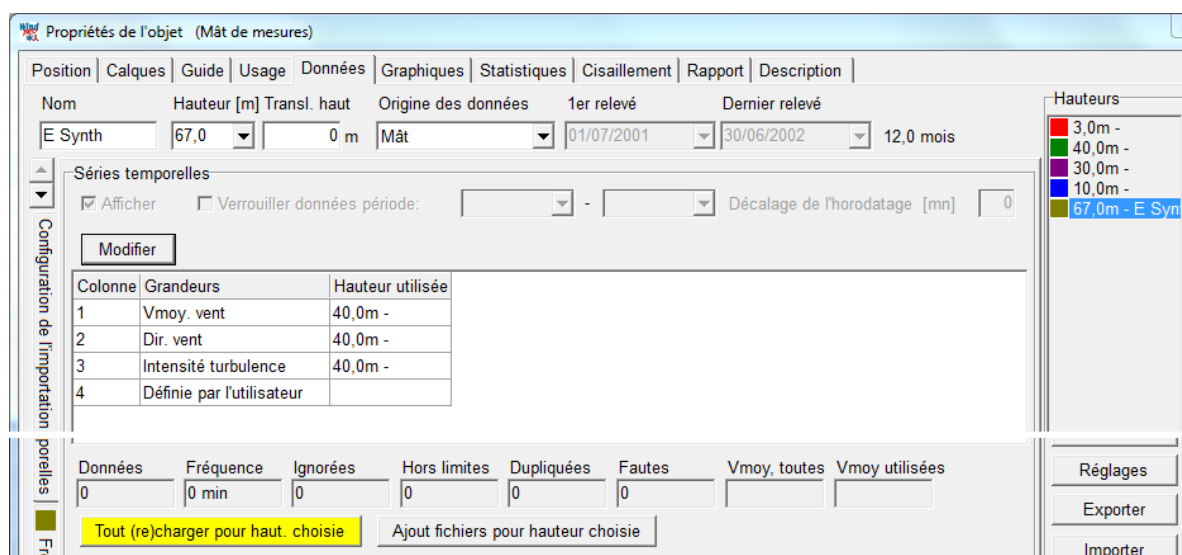


Figure 39

### Sous-onglet *Séries temporelles*

Après avoir cliqué sur le bouton *Tout charger*, les grandeurs choisies sont importées à partir des fichiers et viennent peupler les tableaux du sous-onglet *Séries temporelles* de la Figure 40.

Les grandeurs « marquées » apparaissent sur un fond coloré. Par exemple, les vitesses hors des limites définies dans le sous-onglet *Grandeurs* apparaissent sur un fond turquoise ; en cliquant dans le champ *Hors limites* la fenêtre affiche la première vitesse du tableau hors des limites.

Un clic sur l'en-tête d'une colonne ordonne les valeurs par ordre croissant ou décroissant, ce qui est très pratique pour trouver par exemple la vitesse la plus élevée relevée.

Figure 40

Fonctions des boutons du bandeau à droite du tableau :

- Le bouton **Sélectionner** permet de sélectionner les valeurs *Ignorées*, *Dupliquées*, etc.
- Le pavé de boutons **Action** permet d'appliquer une action aux valeurs sélectionnées : *Copier*, *Supprimer*, etc.
- Le bouton **Filtre** ouvre la fenêtre *Paramétrage du filtre* de la Figure 41 où l'on peut définir des critères permettant de sélectionner les valeurs.  
Dans le cadre supérieur de cette fenêtre se définissent des critères temporels et dans le cadre inférieur des critères relatifs aux *Grandeurs* librement paramétrables.

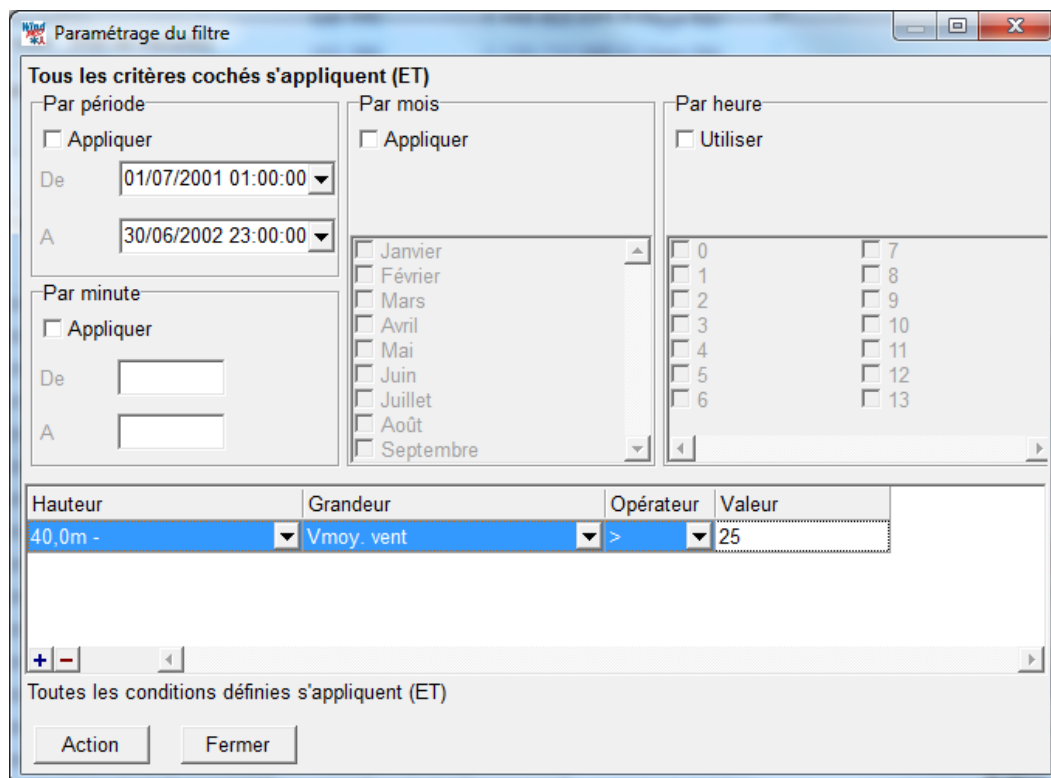


Figure 41

Un clic sur le bouton *Action*, voir Figure 41, ouvre la fenêtre *Application du filtre* de la Figure 42.

Dans la fenêtre de la Figure 42 on sélectionne les grandeurs et les hauteurs (avec même horodatage à +/- 5 mn) auxquelles doit s'appliquer l'action.

L'action est soit *Ignorer* soit *Utiliser* les données filtrées.

Au final, seules les valeurs « marquées » *Utiliser*, qui ne sont pas hors limites ou dupliquées seront utilisées.

Si les séries temporelles de départ sont modifiées le filtrage s'appliquera automatiquement aux séries modifiées.

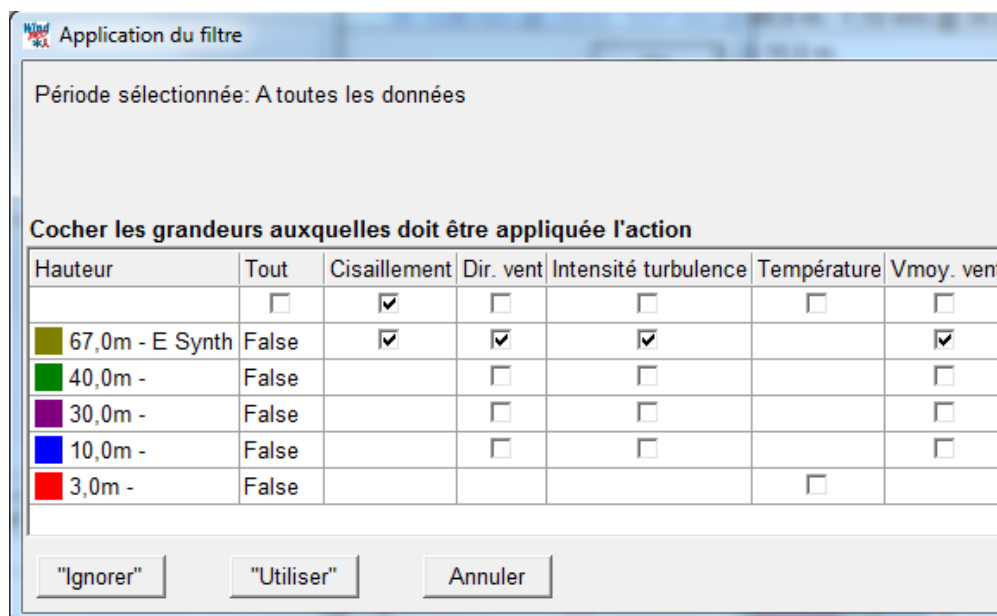


Figure 42



### Sous-onglet *Fréquences*

Le tableau du sous-onglet *Fréquences*, présenté à la Figure 43, donne le nombre d'occurrences du vent par classe de vitesse et par secteur.

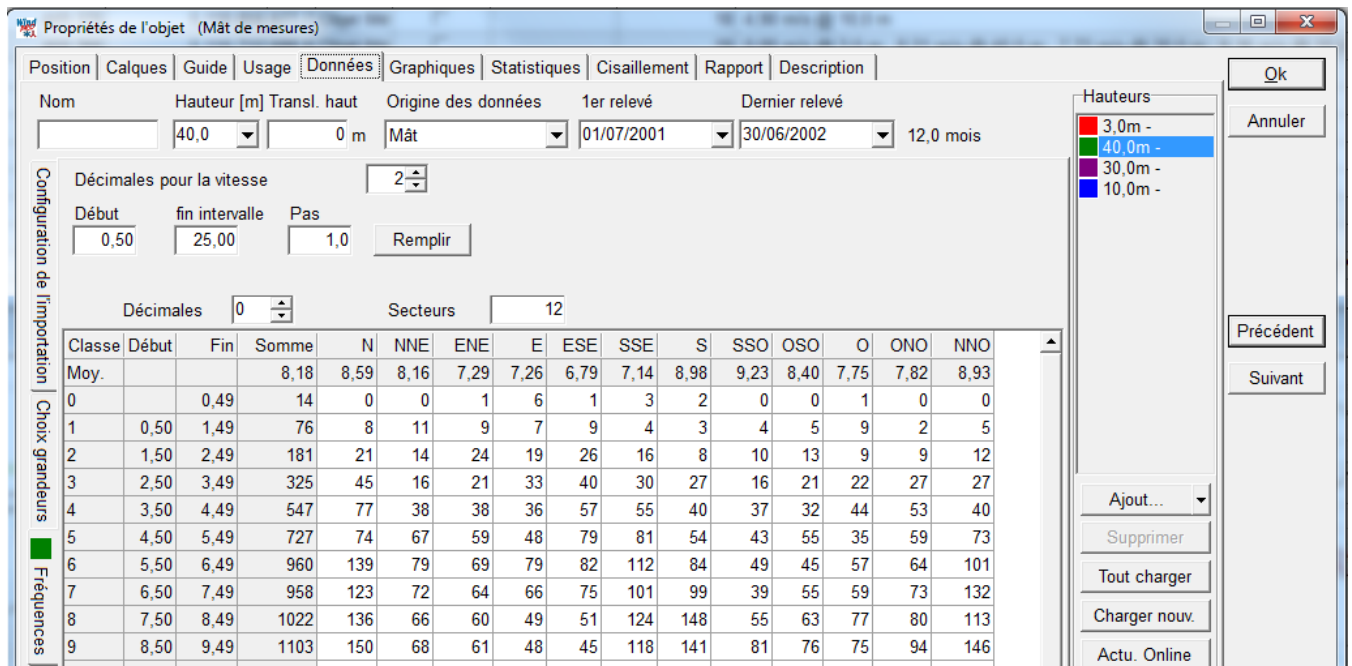


Figure 43

### Sous-onglet *Weibull*

Le tableau du sous-onglet *Weibull*, présenté à la Figure 44, donne, par secteur, les paramètres des distributions de Weibull ajustant au mieux les histogrammes résultant du tableau des *Fréquences*.

La méthode d'ajustement utilisée est celle décrite dans l'Atlas Eolien Européen. Les ajustements de Weibull de l'objet *Météo* sont utilisés par WASP pour les calculs.

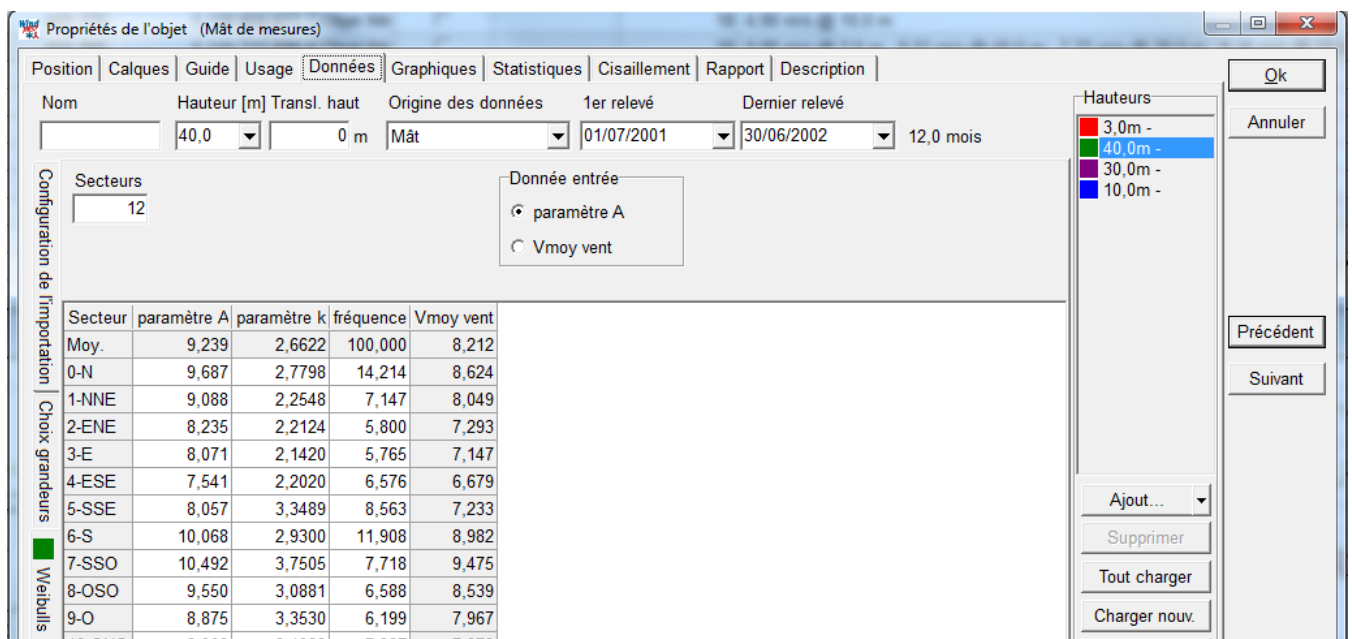


Figure 44

### Sous-onglet *Turbulences*

Le sous-onglet *Turbulences* présente les intensités de la turbulence du vent par classe de vent et par secteur, voir Figure 45.

La valeur représentative de l'intensité dépend de la norme utilisée. Dans le cas de l'IEC ed.2 c'est la valeur moyenne + 1 écart-type, dans le cas de l'IEC ed.3 c'est la valeur moyenne + 1,28 écart-type. La valeur à afficher se choisi à l'aide du menu déroulant à la droite du champ *Secteurs*.

Propriétés de l'objet (Mât de mesures)

Position Calques Guide Usage **Données** Graphiques Statistiques Cisaillement Rapport Description

Nom Hauteur [m] Transl. haut Origine des données 1er relevé Dernier relevé

40,0 0 m Mât 01/07/2001 30/06/2002 12,0 mois

Décimales pour la vitesse 2

Début fin intervalle Pas

0,50 40,00 1,0 Remplir

Décimales 2 Secteurs 12 Valeur moyenne

Classe	Début	Fin	Moy.	N	NNE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSO	OSO	O	ONO	NNO
Moy.			0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09
0		0,49													
1	0,50	1,49													
2	1,50	2,49													
3	2,50	3,49													
4	3,50	4,49	0,14	0,12	0,14	0,18	0,15	0,15	0,14	0,13	0,15	0,13	0,15	0,15	0,14
5	4,50	5,49	0,12	0,11	0,11	0,14	0,12	0,13	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12
6	5,50	6,49	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,11	0,10	0,12	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10
7	6,50	7,49	0,09	0,09	0,09	0,08	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08
8	7,50	8,49	0,09	0,08	0,09	0,08	0,08	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
9	8,50	9,49	0,08	0,09	0,09	0,08	0,08	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08	0,06	0,06	0,08
10	9,50	10,49	0,08	0,09	0,09	0,07	0,08	0,11	0,08	0,08	0,08	0,06	0,05	0,06	0,08

Hauteurs

- 3,0m -
- 40,0m -
- 30,0m -
- 10,0m -

Ajout...  
Supprimer  
Tout charger  
Charger nouv.  
Actu. Online

Figure 45

### 3.3.2.4 Onglet Graphiques

Dans l'onglet *Graphiques*, l'objet *Météo* propose des possibilités d'analyse graphique très évoluées. De plus, l'utilisateur a la possibilité de neutraliser directement sur les chronogrammes les valeurs jugées incorrectes.



Le bouton, ci-contre, donne accès à un utilitaire d'exportation du graphique et des données correspondantes.

L'onglet *Graphiques* est composé des sous-onglets suivants :

- *Séries temporelles*
- *Weibull/Fréquences*
- *Roses*
- *Turbulences*
- *Ecarts de vitesses*
- *Graphiques xy*
- *Profil*

A la suite est présentée une sélection de graphiques issue de ces sous-onglets. Normalement, les graphiques non présentés sont compréhensibles sans explications.

#### Sous-onglet *Séries temporelles*

Quand dans le sous-onglet *Séries temporelles* la représentation sous forme de *Chronogrammes* est choisie, il est possible de sélectionner les *Grandeurs* et les *Hauteurs* à afficher, de délimiter un intervalle dans lequel les valeurs seront ignorées, d'ajouter des commentaires, etc., voir la Figure 46.

On peut zoomer sur une partie du graphique en la balayant avec la souris.

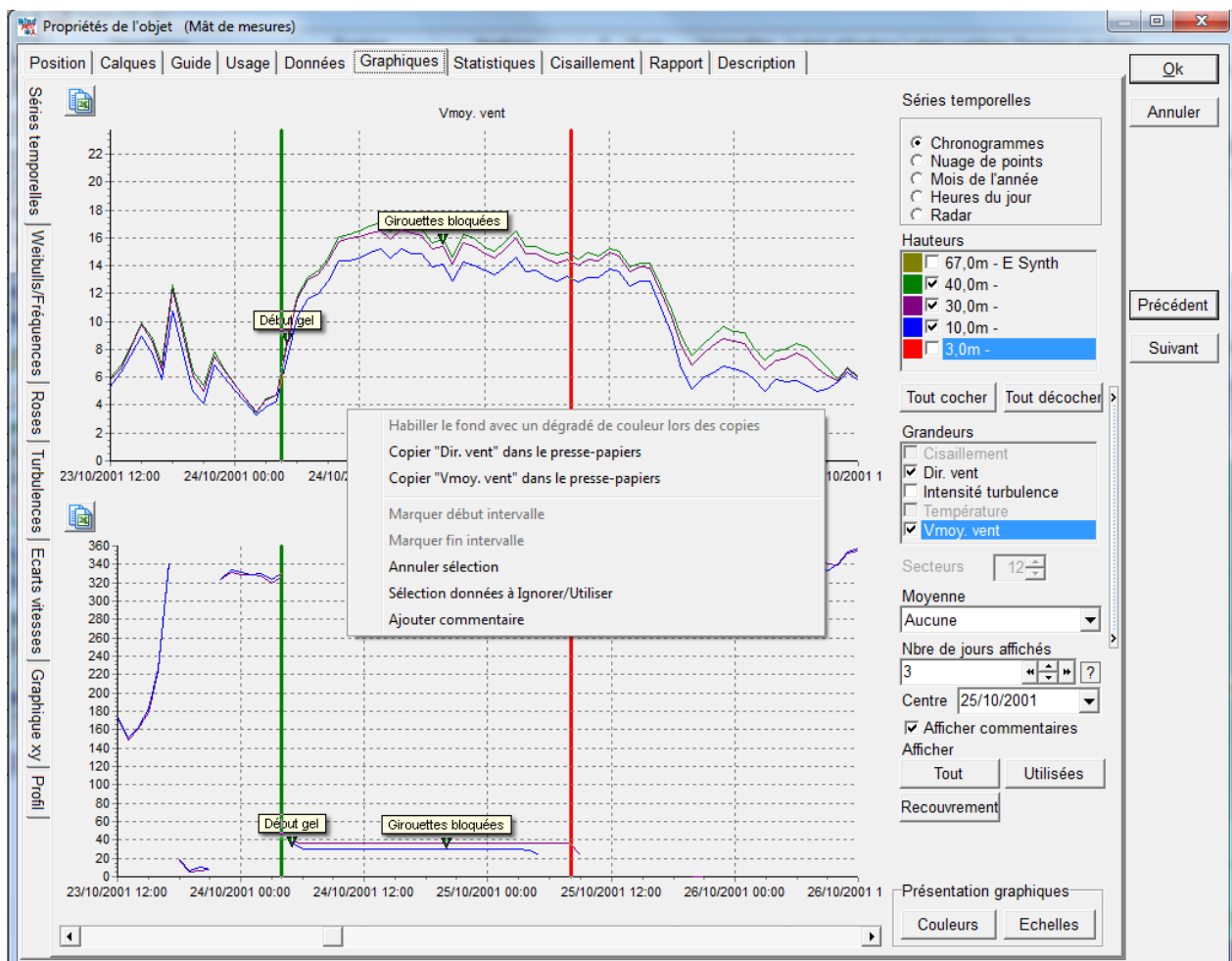


Figure 46

Sous-onglet *Weibull/Fréquences*

Dans le sous-onglet *Weibull/Fréquences* de la Figure 47 est représenté l'*Histogramme des Fréquences des vitesses* et son ajustement par une distribution de Weibull.

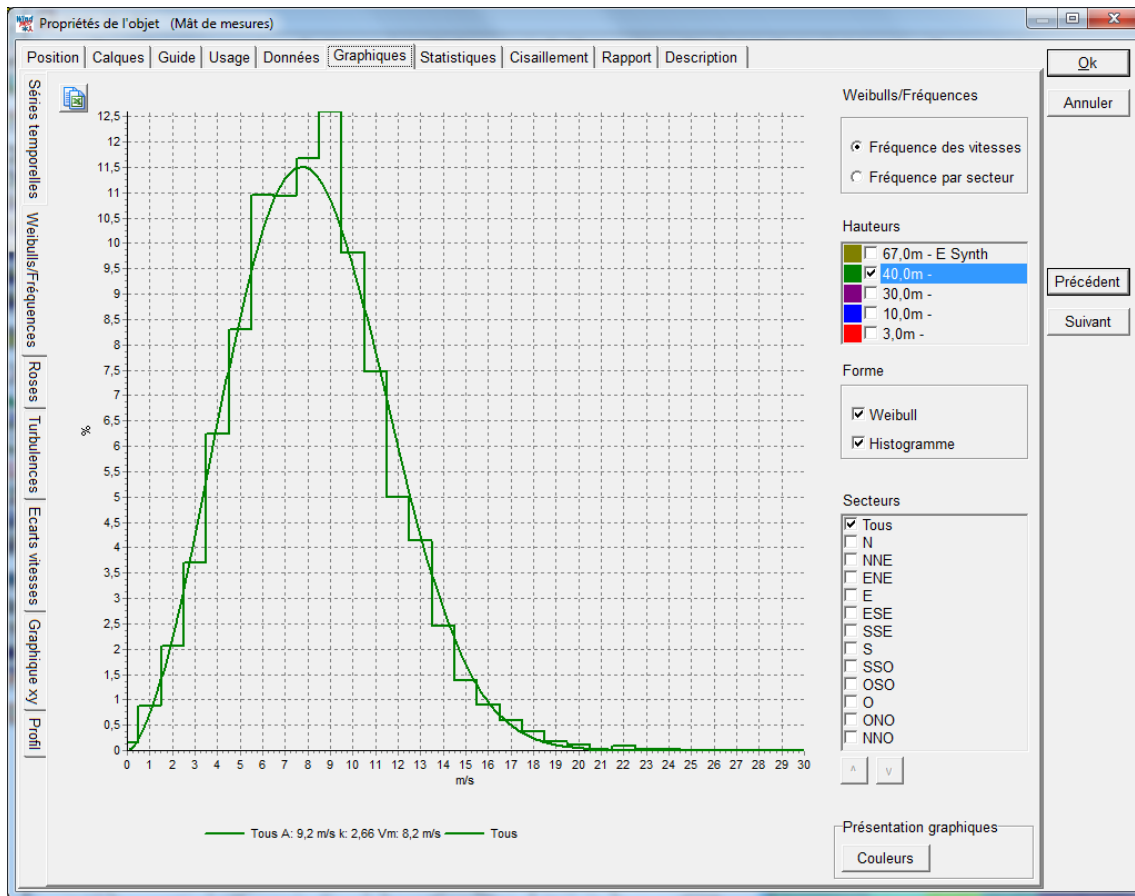
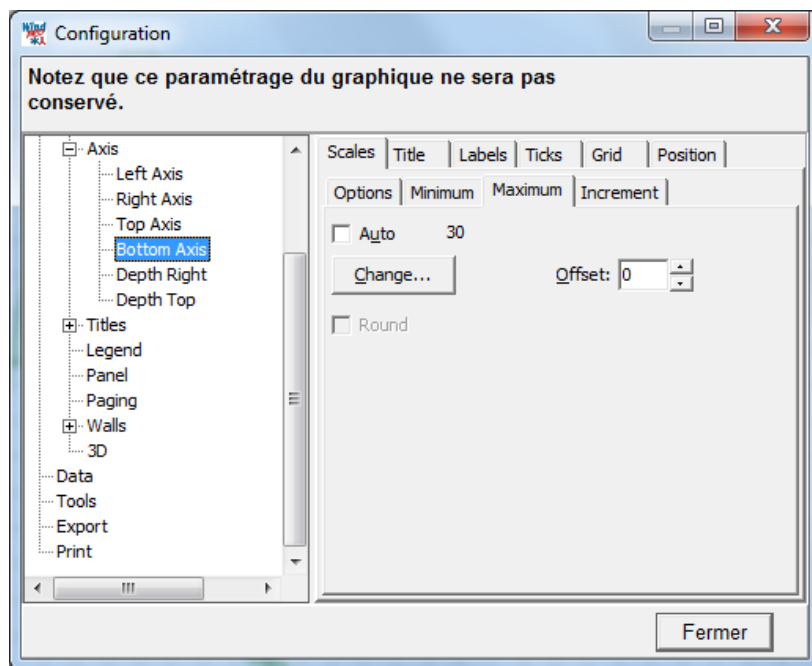


Figure 47



Les axes du graphique peuvent être ajustés en appelant la fenêtre de *Configuration* de la Figure 48 par un double clic sur le graphique.

Figure 48

### Sous-onglet *Roses*

L'exemple de la Figure 49, montre la fréquence du vent pour chaque mois de l'année pour la hauteur choisie.

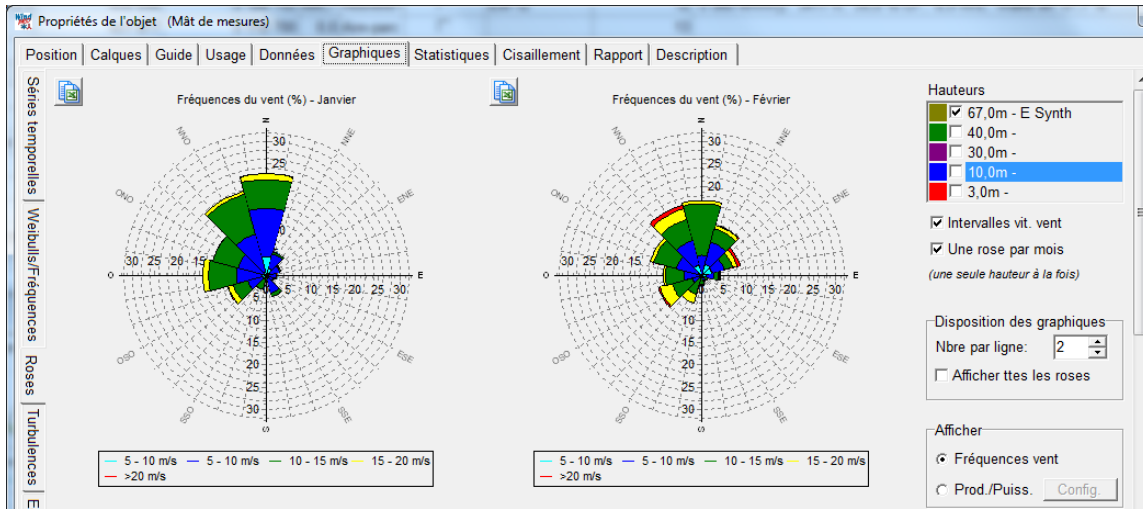


Figure 49

### Sous-onglet *Turbulences*

L'exemple de la Figure 50 montre la turbulence aux deux hauteurs cochées. La norme IEC de vérification est choisie dans le cadre *Grandeurs*.

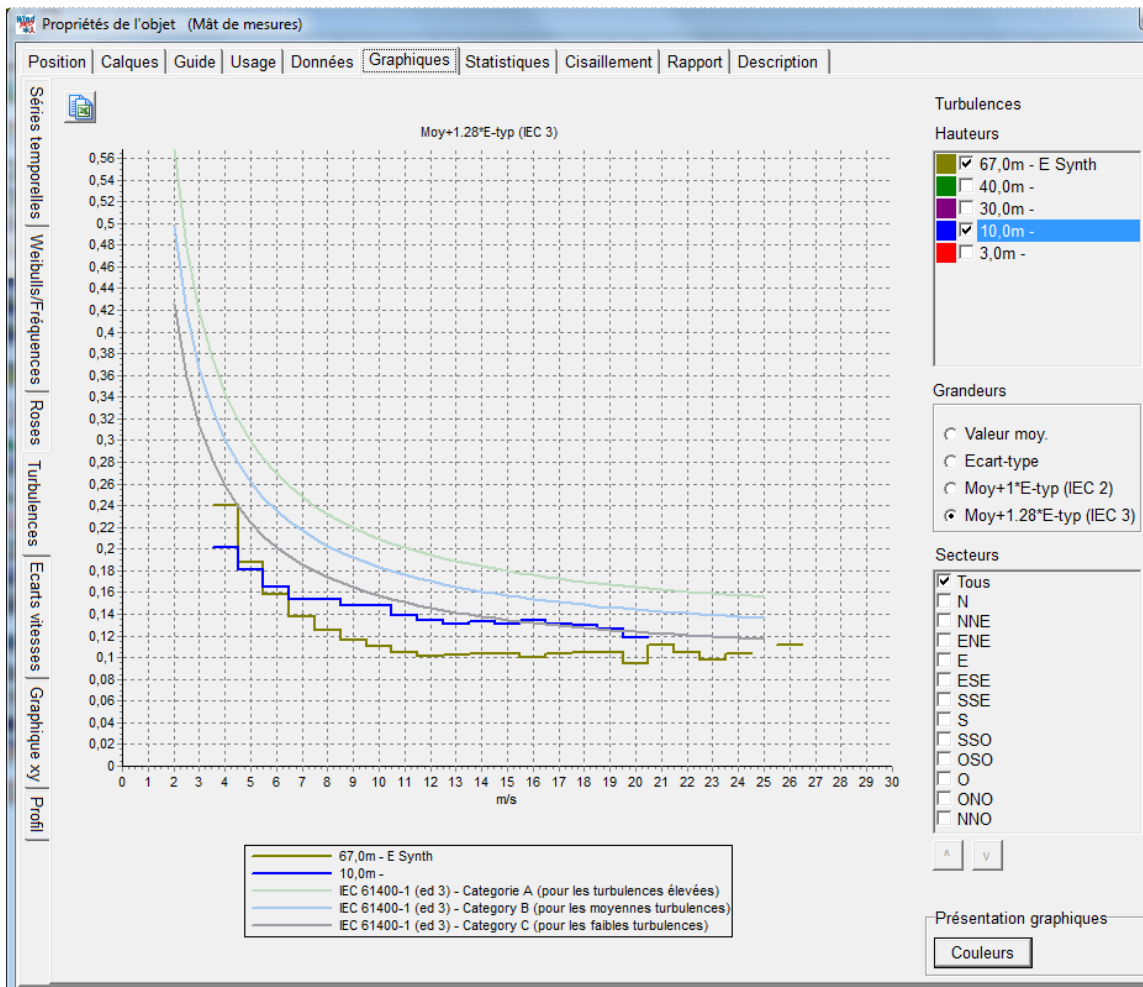


Figure 50



### Sous-onglet *Ecarts des vitesses*

Dans ce sous-onglet on peut comparer les vitesses mesurées par 2 anémomètres, voir Figure 51. La comparaison peut se faire sous forme de *Différences* ou de *Rapports* des vitesses. Ce type de représentation est utile pour mettre en évidence la direction des supports et leurs effets.

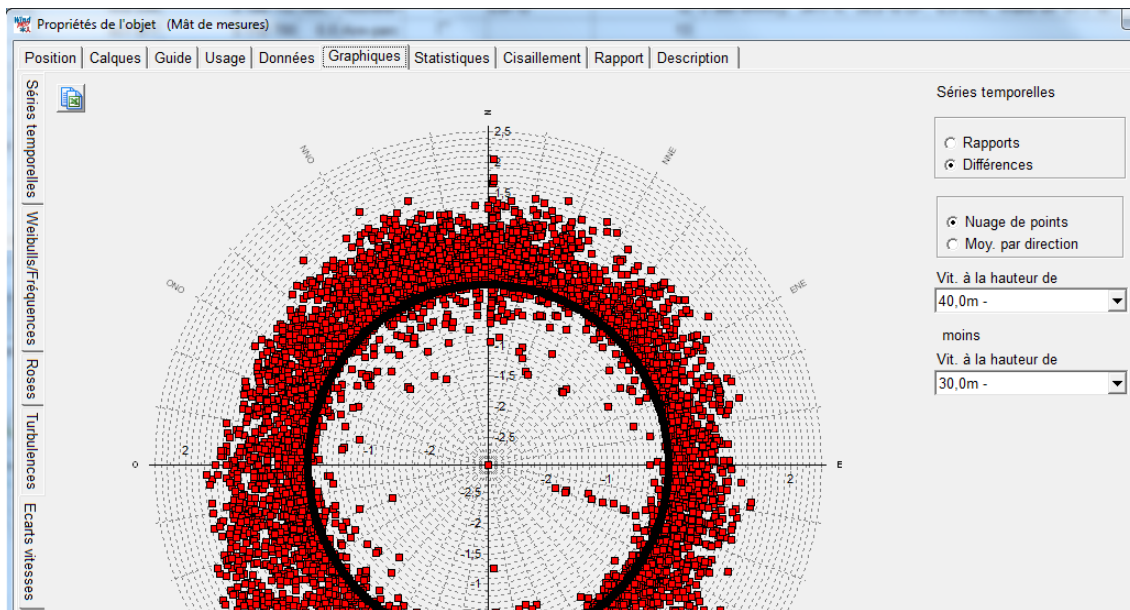
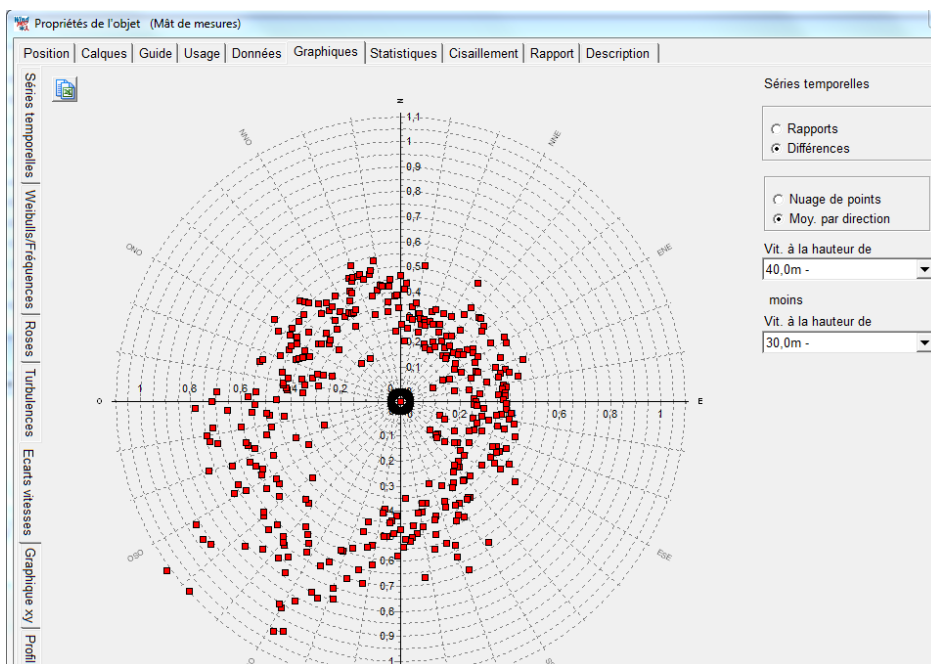


Figure 51

La comparaison peut se faire considérant la *Moyenne par direction*, voir Figure 51.



Dans cet exemple, le « cisaillement » semble être plus important pour les directions SO que pour les directions NE.

Cela s'explique par le profil du terrain dont les pentes sont plus fortes au NE et par le fait que l'accélération de la vitesse du vent diminue avec la hauteur..

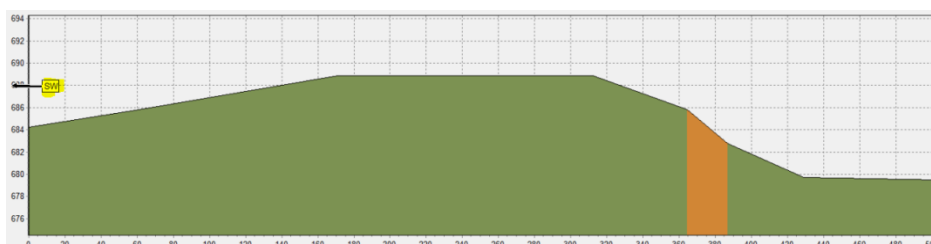


Figure 52

### Sous-onglet *Graphique xy*

Ce sous-onglet, voir Figure 53, permet de visualiser sous forme de graphique xy la relation entre 2 grandeurs quelconques. Quand on passe le pointeur de la souris sur un point du graphique une fenêtre s'ouvre donnant les valeurs des grandeurs x et y ainsi que l'horodatage. Si un point semble anormal, il est ainsi possible de l'«ignorer» et aussi de le visualiser dans les chronogrammes. L'option *Ligne de marquage* permet d'«ignorer» en bloc tous les points situés sur ou sous la ligne.

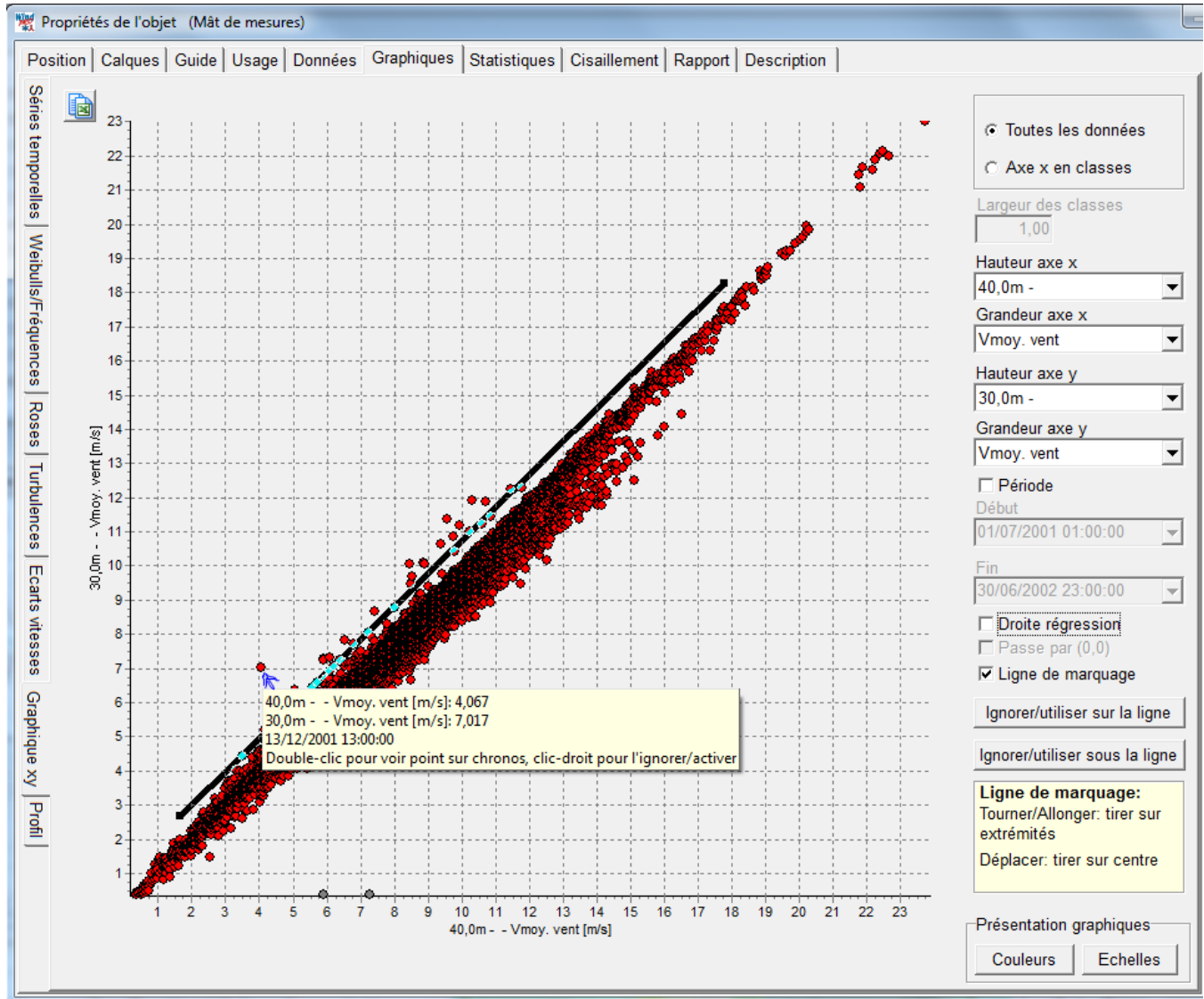


Figure 53

### Sous-onglet Profil

Ce sous-onglet permet de visualiser le profil vertical du vent et la coupe du terrain. C'est un bon moyen de vérifier que WASP restitue bien la réalité des mesures, voir Figure 54.

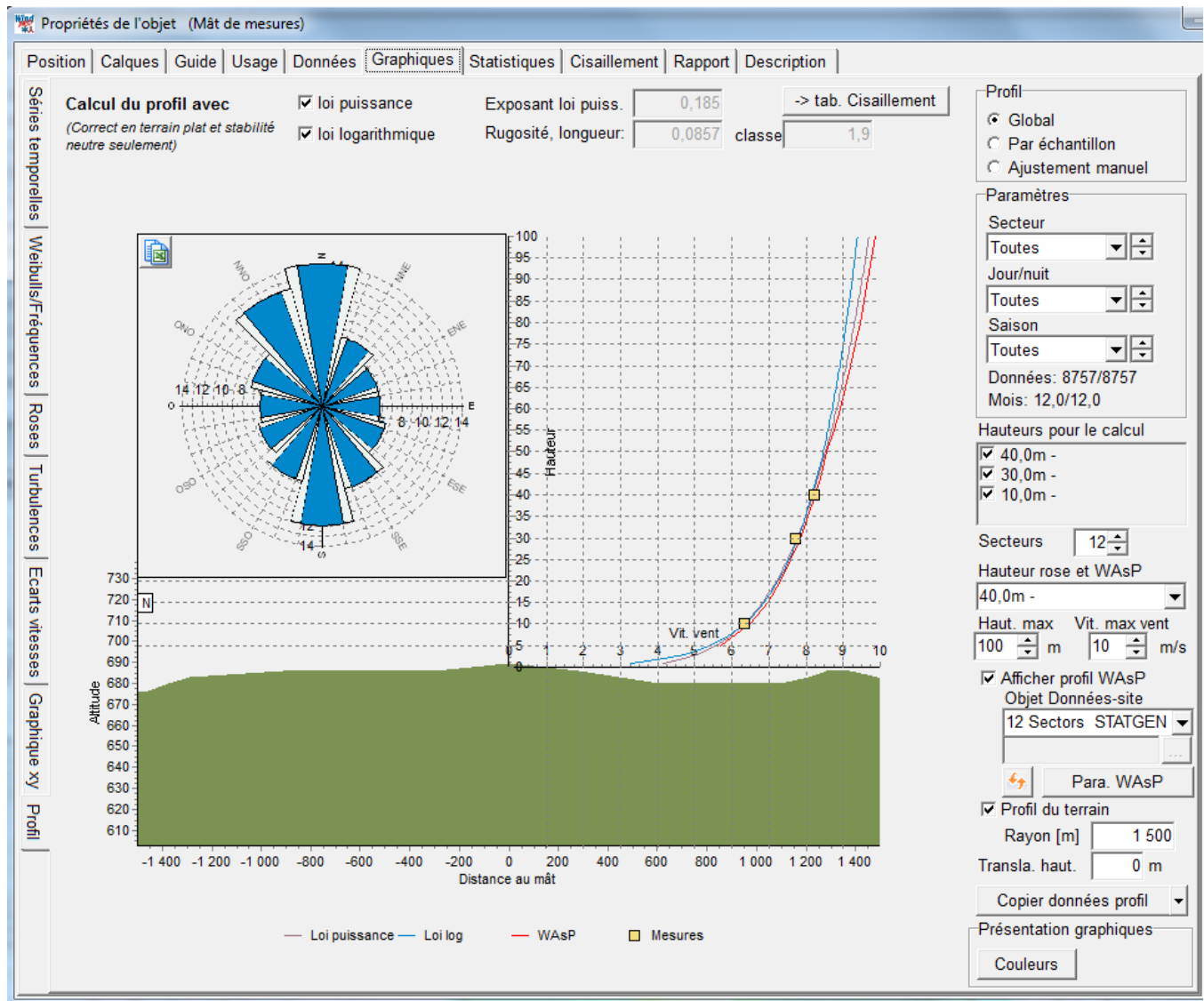


Figure 54

Trois options de visualisation du profil vertical du vent sont proposées :

- *Global* : les vitesses moyennes sont calculées aux hauteurs choisies avec tous les relevés concomitants.
- *Par échantillon* : permet de visualiser l'évolution du profil en faisant défiler automatiquement ou manuellement l'ajustement pour chaque enregistrement (toutes les 10mn, toutes les heures,...),
- *Ajustement manuel* : permet d'entrer manuellement les valeurs dans les champs *Exposant loi puiss.* et/ou *Rugosité* et de visualiser les profils résultants.

WASP calcule le profil à partir des mesures du vent à une seule hauteur (de la rugosité et du relief du terrain). Le menu *Hauteur rose et WASP* permet de choisir la hauteur de mesure à partir de laquelle WASP calculera le profil qui sera affiché si l'option *Afficher profil WASP* a été cochée.

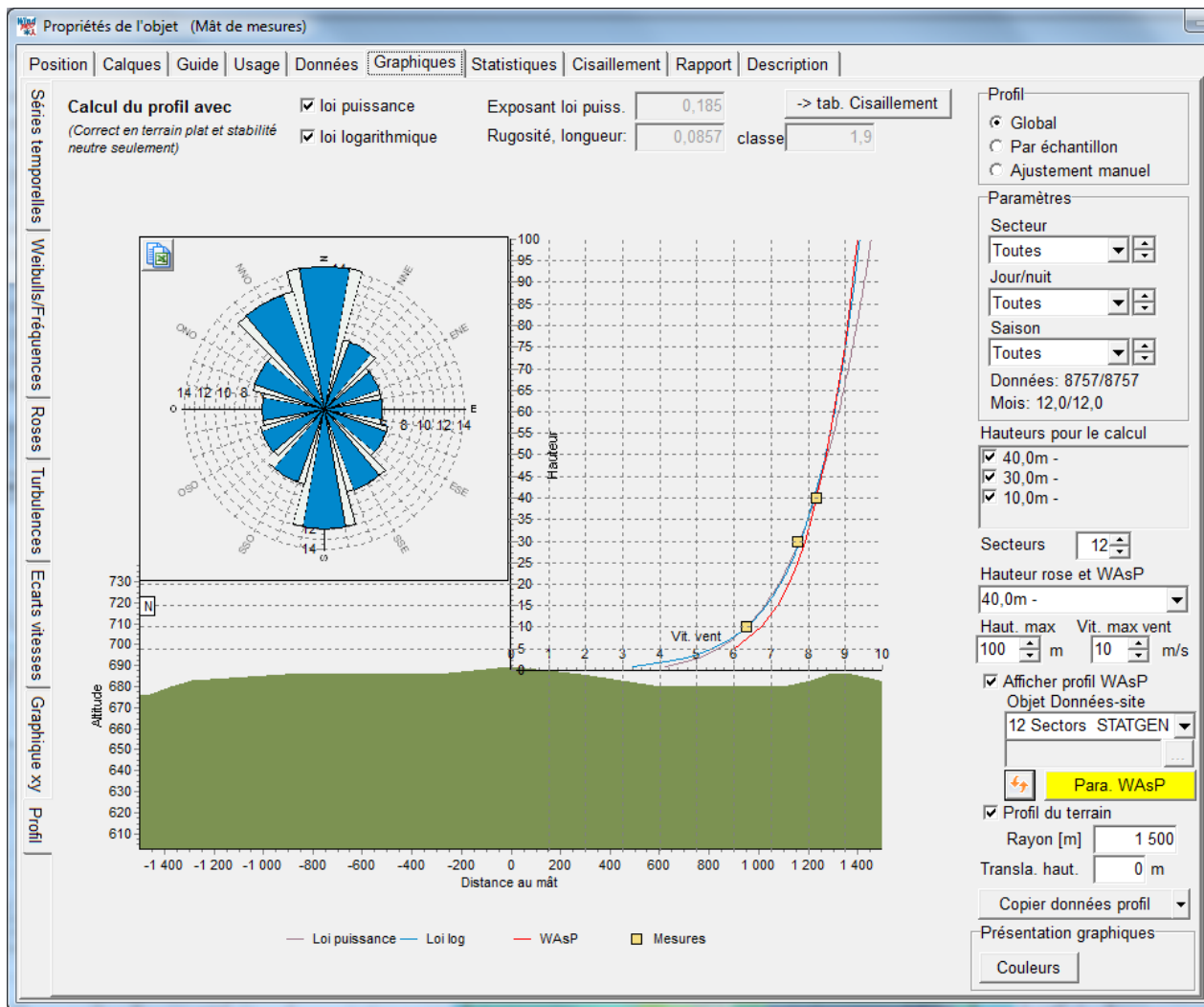
Les extrapolations à partir des lois *logarithmique* et *puissance* ne donnent des résultats acceptables qu'en terrain plat. Si l'écoulement du vent est perturbé par le relief ces lois ne sont pas pertinentes. Dans ce cas, le profil calculé avec WASP donnera de meilleurs résultats étant que le modèle d'écoulement utilisé par WASP prend en compte les effets du terrain.

Le bouton *Para. WAsP* ouvre la fenêtre de réglage de WAsP, voir Figure 55.

Dans cet exemple le paramètre *Offset heat flux over land* a été changé, on note que le profil vertical du vent calculé par WAsP est sensible modifié par rapport à celui calculé avec le paramètre standard de la Figure 54.

Cet utilitaire permet de trouver les meilleurs réglages par comparaison avec les mesures.

L'utilisation de cet outil ne doit pas se faire sans une connaissance avancée de la « physique » du vent.



Paramètre	Minimum	Maximum	Standard	Valeur
+ Site roughness assessment (Paramètres non standards: 0)				
- WAsP wind modelling (Paramètres non standards: 1)				
Avg. offset over land from neutral at z=P2	0,01	0,25	0,11	0,11
Azimuth resolution in BZ model [°]	1	15	5	5
Decay-length for roughness area size	1000	1000000	10000	10000
Depth of daily variation over land	50	100	100	100
Depth of daily variation over water	25	300	50	50
Factor in height of min. stab. induced var.	0	0,005	0,002	0,002
Height of inversion in BZ model	100	5000	1000	1000
Max. interpolation radius in BZ model	5000	50000	20000	20000
Offset heat flux over land	-200	200	-40	0
Offset heat flux over water	-200	200	15	15

Figure 55

### 3.3.2.5 Onglet Statistiques

L'onglet *Statistiques* est formé des trois sous-onglets suivants :

- *Principales statistiques*
- *Statistiques mensuelles*
- *Acquisition*

#### Sous-onglet *Principales statistiques*

Ce sous-onglet est présenté à la Figure 56.

Les *Principales statistiques* peuvent être réorganisées en les groupant, voir Figure 57. Par exemple, pour les grouper par *Grandeur* il suffit de faire glisser avec la souris le titre de la colonne *Grandeur* dans la zone *Faites glisser les en-têtes des colonnes ICI pour grouper par en-têtes*.

Propriétés de l'objet (Mât de mesures)											
Position   Calques   Guide   Usage   Données   Graphiques   <b>Statistiques</b>   Cisaillement   Rapport   Description											
Principales stat.   Stats mensuelles   Acquisition											
Faites glisser les en-têtes des colonnes ICI pour grouper par en-têtes											
	Grandeur	Unité	Nombre	Pourcent	Moy.	Ecart-type	Mini	Maxi	Weibull moy.	Weibull A	Weibull k
40,0m -	Vmoy. vent, toutes	m/s	8757	100,0 %	8,18		0,36	23,73	8,21	9,24	2,6622
40,0m -	Dir. vent, toutes	Degrés	8757	100,0 %	321,4		0,0	359,0			
40,0m -	Intensité turbulence, toutes		8757	100,0 %	0,1040	0,0615	0,0000	0,6000			
40,0m -	Intensité turbulence, utilisées		7893	90,1 %	0,0918	0,0379	0,0261	0,3444			
30,0m -	Vmoy. vent, toutes	m/s	8757	100,0 %	7,74		0,36	23,02	7,72	8,70	2,5570
30,0m -	Dir. vent, toutes	Degrés	8757	100,0 %	321,4		0,0	359,0			
30,0m -	Intensité turbulence, toutes		8757	100,0 %	0,1105	0,0625	0,0000	0,6667			
30,0m -	Intensité turbulence, utilisées		7826	89,3 %	0,0976	0,0368	0,0308	0,3556			
10,0m -	Vmoy. vent, toutes	m/s	8759	100,0 %	6,47		0,36	21,05	6,36	7,18	2,1620
10,0m -	Dir. vent, toutes	Degrés	8759	100,0 %	286,0		0,0	359,0			
10,0m -	Intensité turbulence, toutes		8759	100,0 %	0,1371	0,0671	0,0000	0,7143			
10,0m -	Intensité turbulence, utilisées		7119	81,3 %	0,1209	0,0346	0,0494	0,3587			

Figure 56

Propriétés de l'objet (Mât de mesures)											
Position   Calques   Guide   Usage   Données   Graphiques   <b>Statistiques</b>   Cisaillement   Rapport   Description											
Principales stat.   Stats mensuelles   Acquisition											
Grandeur ▾											
	Unité	Nombre	Pourcent	Moy.	Ecart-type	Mini	Maxi	Weibull moy.	Weibull A	Weibull k	
- Grandeur : Vmoy. vent, toutes											
40,0m -	m/s	8757	100,0 %	8,18		0,36	23,73	8,21	9,24	2,6622	
30,0m -	m/s	8757	100,0 %	7,74		0,36	23,02	7,72	8,70	2,5570	
10,0m -	m/s	8759	100,0 %	6,47		0,36	21,05	6,36	7,18	2,1620	
± Grandeur : Intensité turbulence, utilisées											
± Grandeur : Intensité turbulence, toutes											
± Grandeur : Dir. vent, toutes											

Figure 57



### Sous-onglet *Statistiques mensuelles*

Propriétés de l'objet (Mât de mesures)

Position | Calques | Guide | Usage | Données | Graphiques | **Statistiques**

Principales stat. | Stats mensuelles | Acquisition

Hauteur (Stats sur les données "utilisées")  
40,0m -

Grandeur  
Vmoy. vent

40,0m - Vmoy. vent	2001	2002	Moy.	Moy. du mois
Janvier		8,07	8,07	8,07
Février		9,60	9,60	9,60
Mars		8,18	8,18	8,18
Avril		8,33	8,33	8,33
Mai		8,86	8,86	8,86
Juin		7,93	7,93	7,93
Juillet	6,88		6,88	6,88
Août	7,32		7,32	7,32
Septembre	7,67		7,67	7,67
Octobre	8,69		8,69	8,69
Novembre	8,37		8,37	8,37
Décembre	8,38		8,38	8,38
Moy. toutes les données	7,88	8,48	8,18	
Moy. des mois	7,88	8,49		8,19

Ce sous-onglet est présenté à la Figure 58. Les tableaux peuvent être copiés dans le presse-papiers et collés ensuite dans la feuille de calcul d'un tableur ; pour cela il faut sélectionner toutes les valeurs en les balayant avec le pointeur de la souris tout en maintenant le bouton gauche enfoncé, puis appeler le menu contextuel par un clic droit et choisir *Copier*.

Figure 58

### Sous-onglet *Acquisition*

La Figure 59 montre l'onglet *Acquisition* qui permet de voir s'il manque des relevés. Les journées où le nombre de relevés est conforme sont présentés en vert.

Propriétés de l'objet (Mât de mesures)

Position | Calques | Guide | Usage | Données | Graphiques | **Statistiques** | Cisaillement | Rapport | Description

Principales stat. | Stats mensuelles | **Acquisition**

Paires (vit., dir.) disponibles  
40,0m -

Taux: 100,0%    Durée effective: 12,0 mois    Durée calendaire: 12,0 mois  
Utilisées: 100,0%    Durée effective: 12,0 mois    Durée calendaire: 12,0 mois

40,0m - %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
07/2001	100,0	23	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
08/2001	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
09/2001	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
10/2001	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
11/2001	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
12/2001	99,7	24	24	24	24	22	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
01/2002	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
02/2002	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
03/2002	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
04/2002	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
05/2002	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
06/2002	100,0	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
All	100,0																														

Figure 59

### 3.3.2.6 Onglet Cisaillement

La Figure 60 montre le contenu de l'onglet *Cisaillement*. Il n'y a pas de limites dans le nombre de jeux de valeurs qui peuvent être enregistrés.

Dans le cadre inférieur à fond jaune est expliquée l'utilisation de cet onglet. Il est habituel de « transférer » les données de cisaillement à partir du sous-onglet *Profil* de l'onglet *Graphiques* en cliquant sur le bouton -> *tab. Cisaillement*, voir Figure 54.

Propriétés de l'objet (Mât de mesures)

Position | Calques | Guide | Usage | Données | Graphiques | Statistiques | **Cisaillement** | Rapport | Description

Nom  
Time series 40,0m - ;30,0m -

Secteurs  
12

Utilisé dans l'intervalle [m]  
30,0 40,0

Correction du paramètre k  
0,0080 par mètre

Ajout. manuel Coller  
Supprimer De Weibull

Secteur	Exposant loi exp	Rugosité loi log
Average	0,213	0,3159
N	0,175	0,1148
NNE	0,137	0,0238
ENE	0,164	0,0782
E	0,166	0,0830
ESE	0,199	0,2272
SSE	0,219	0,3588
S	0,244	0,5734
SSO	0,261	0,7496
OSO	0,273	0,8890
O	0,244	0,5720
ONO	0,186	0,1601
NNO	0,236	0,5029

Correction de k par défaut  
Time series 40,0m - ;30,0m - ;10,0m -  
Time series 40,0m - ;30,0m -

Plusieurs jeux de valeurs peuvent être enregistrés. Le choix des cisaillements à utiliser dans les calculs se fait en indiquant le nom du jeu de valeurs. Bien noter que l'utilisation de ces lois, ailleurs que sur des terrains plats, peut conduire à des extrapolations notablement erronées. En relief complexe, il est nécessaire d'utiliser des modèles d'écoulement prenant en compte les effets du terrain (WAsP).

Les valeurs de cisaillement peuvent être:

- 1) chargées à partir d'un objet météo WP2.5
- 2) entrées manuellement avec le bouton "Ajout. manuel"
- 3) créées à partir de l'onglet Graphique-Profil (recommandé)

Les valeurs de cisaillement sont utilisées pour:

- 1) extrapoler les vitesses de vent mesurées et les utiliser directement pour faire des calculs de productibles
- 2) par d'autres outils qui requièrent les valeurs de cisaillement

Figure 60

Ici, les cisaillements sont calculés à partir des vitesses moyennes données par les ajustements de Weibull en utilisant les relevés concomitants.

Les relevés de la direction du vent sont pris sur une seule girouette. Auparavant, les directions étaient prises à la même hauteur que les vitesses (s'il y avait une girouette). Ce changement a été introduit avec la version 2.7 ; cette approche est plus robuste car on a constaté que des problèmes de girouettes pouvaient conduire à des valeurs de cisaillement irréalistes.

### 3.3.2.7 Onglet Rapport

Outre le rapport standard produit par le calcul METEO, on peut définir un rapport totalement personnalisable à partir de l'onglet *Rapport* montré à Figure 61.

Une fois la personnalisation du rapport terminée, elle peut être sauvegardée comme modèle et réutilisée par la suite.

The screenshot shows the 'Rapport' tab in the 'Propriétés de l'objet' window. The window title is 'Propriétés de l'objet (Mât de mesures)'. The tabs at the top are: Position, Calques, Guide, Usage, Données, Graphiques, Statistiques, Cisaillement, Rapport, and Description. The 'Rapport' tab is active.

**Configuration générale**

Nom:

Inclure champ Description de l'objet dans le rapport

Nbre secteurs (dans tous les rapports)

Choix des données à montrer dans les Principaux résultats du rapport

- 40,0m -
- 30,0m -
- 10,0m -

Choix des données à montrer dans les Résultats détaillés du rapport

- 40,0m -
- 30,0m -
- 10,0m -

Période à considérer pour le rapport

- Toute la période
- Toute la dernière année
- Tout le dernier trimestre
- Tout le dernier mois
- Définir la période

de  à

Options du rapport

- 
- 
- 
- 

La section Principaux résultats du rapport est formée deux pages qui ne sont pas personnalisables. Par contre, dans la partie Résultats détaillés, le contenu est défini par l'utilisateur. Après avoir pressé sur le bouton <Afficher> les deux sections du rapport peuvent être ouvertes séparément.

**Configuration détaillée**

Fichiers et structure des données |  Acquisition des données |  Séries temporelles |  Tableaux |  Graphiques, divers

Inclure

Moyenne   Aff. Commentaires sur graphique

Présenter toute la période en une seule page

mois  par page

Grandeur 1  }  1 par page (graph. de grande taille)

Grandeur 2  }  2 par page (graph. de taille moy.)

Grandeur 3  }  3 par page (graph. de petite taille)

Grandeur 4

Figure 61

Quand les opérations dans les différents onglets sont terminées, refermez la fenêtre *Propriétés* pour que le contenu de l'objet *Météo* soit disponible pour les calculs.

Si vous souhaitez générer une *Statistique éolienne* avec WASP à partir des mesures de vent contenues dans l'objet *Météo*, il faudra, avant de lancer le calcul STATGEN, créer un objet *Données-site* qui transmettra à WASP la description du relief, de la rugosité et des obstacles dans le voisinage de l'objet *Météo*.

### 3.3.3 Météo-analyser



Le *Météo-analyser* se lance à partir de la barre d'outils, en cliquant sur le bouton représenté ci-contre, ou à partir du menu *Outils*.

Le *Météo-analyser* travaille directement sur les données contenues dans les objets *Météo*. Il permet de travailler en parallèle sur les données de plusieurs objets *Météo* et d'effectuer des opérations qui ne sont pas possibles à partir des objets *Météo* telles que:

- La comparaison graphique des données de plusieurs objets *Météo* (mâts de mesure),
- L'application de la fonction *Ignorer/Utiliser* simultanément aux données, se rapportant aux périodes communes (recouvrement), de plusieurs objets *Météo* (mâts de mesure),
- Les opérations *Substituer/Ajouter* des données dans un objet cible à partir des données d'un objet source avec possibilité de faire des ajustements d'échelle,
- Le *Contrôle croisé* qui permet de tester WAsP en calculant les caractéristiques du vent au niveau d'un mât A (à partir des mesures d'un mât B) et en comparant le résultat avec les mesures faites au mât A (ou le contrôle de l'extrapolation verticale sur un même mât),
- Le calcul de *Distributions temporelles* (séries temporelles) présentant les caractéristiques nécessaires pour certains calculs avec les modules PARK et PERTES & INCERTITUDES. Ces caractéristiques sont la durée, qui doit être égale à un an, et une périodicité suffisante (1 heure, 10mn,...). La fonction *Distribution temporelle* calcule des séries avec ces caractéristiques à partir de séries existantes en faisant des combinaisons, des extrapolations et du remplissage.

Exemples d'utilisation:

Vous disposez des mesures de vent issues de deux capteurs montés sur un même mât, à la même hauteur, l'un sur un support orienté vers le nord et l'autre sur un support orienté vers le sud. Vous souhaitez utiliser les mesures du capteur nord lorsque le vent vient du secteur 270°-90° celles du capteur sud pour les autres directions.

La procédure à suivre est la suivante :

- *Ignorer* les données du secteur 90°-270° issues du capteur nord à l'aide des options *Filtre Ignorer/Utiliser* (disponible dans l'objet *Météo* et aussi dans le *Météo-analyser*),
- Créer une copie de la série de données issues du capteur nord et substituer les données marquées *ignorées* par celles du capteur sud.
- La nouvelle série mesures contient maintenant les données voulues.

La situation de cet exemple sera plutôt traitée avec la fonction *Combinaison de données* de l'objet *Météo*, mais elle illustre bien la fonction *Substituer/Ajouter*.

Autre exemple : une girouette tombe en panne, les données de direction manquantes peuvent être reconstituées avec *Substituer/Ajouter* à partir de données méso-échelle ou d'un autre mât du voisinage.

Le *Météo-analyser* est un outil très puissant :

- Si des fichiers ont été ajoutés dans les dossiers des mâts de mesure la fonction *Charger nouv. fichiers* permet d'actualiser tous les objets *Météo* correspondants en même temps.
- La fonction *Créer des objets Météo à partir de Données-online* permet le téléchargement de plusieurs jeu de données en une seule opération.

### 3.3.3.0 Calendrier des périodes avec données des différents mâts de mesures

#### Onglet *Données*

Cet onglet présente l'ensemble des données disponibles. Le choix des données à utiliser pour les analyses se fait en cochant les cases correspondantes dans la colonne *Utiliser*, voir Figure 62.

Utiliser	Modifié	Description	Hauteur	Usage	1ère donnée	Der. donnée	Nb de mois	Translation de hauteur	Taux acq.	Distance	Fichiers à jour
<input checked="" type="checkbox"/>	False	K1 M179	49,0m -	Pour le Météo-analyser	01/11/2001	01/11/2002	12,0	0,0	100,0 %	1,2	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	K1 M179	47,0m -	Pour le Météo-analyser	01/11/2001	01/11/2002	12,0	0,0	100,0 %	1,2	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	K1 M179	24,0m -	Pour le Météo-analyser	01/11/2001	01/11/2002	12,0	0,0	100,0 %	1,2	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	K2 M180	49,0m -	Pour le Météo-analyser	20/10/2001	19/10/2002	12,0	0,0	100,0 %	2,4	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	K2 M180	48,0m -	Pour le Météo-analyser	20/10/2001	19/10/2002	12,0	0,0	100,0 %	2,4	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	K2 M180	24,0m -	Pour le Météo-analyser	20/10/2001	19/10/2002	12,0	0,0	100,0 %	2,4	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	5515	42,0m - srf	Pour le Météo-analyser	01/01/1978	01/02/2008	361,2	0,0	100,0 %	102,0	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	5515	10,0m - u10	Pour le Météo-analyser	01/01/1978	02/02/2008	361,2	0,0	100,0 %	102,0	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	1755	42,0m - srf	Pour le Météo-analyser	01/01/1978	01/02/2008	361,2	0,0	100,0 %	166,6	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	1755	10,0m - u10	Pour le Météo-analyser	01/01/1978	02/02/2008	361,2	0,0	100,0 %	166,6	?
<input checked="" type="checkbox"/>	False	1552	42,0m - srf	Pour le Météo-analyser	01/01/1978	01/02/2008	361,2	0,0	100,0 %	182,0	?

Buttons: Tout décocher, Options, Charger nouv. fichiers, Afficher tableau (selected), Afficher diagramme, Mettre à jour, Filtre Utiliser/Ignorer, Enreg. modifications, Périodes communes, Créer des objets Météo à partir des Données.Online, Actualiser Online.

Figure 62

L'option *Afficher diagramme* permet de visualiser, graphiquement pour chaque série, les périodes où il y a des données, voir Figure 63.

Utiliser	Description	Hauteur	Période 01/01/1978 07:00:00 - 02/02/2008 01:00:00
<input checked="" type="checkbox"/>	K1 M179	49,0m -	=====
<input checked="" type="checkbox"/>	K1 M179	47,0m -	=====
<input checked="" type="checkbox"/>	5515 conc Koz	42,0m - srf	=====
<input checked="" type="checkbox"/>	5515 conc Koz	10,0m - u10	=====

Buttons: Tout décocher, Options, Charger nouv. fichiers, Afficher tableau, Afficher diagramme (selected), Mettre à jour, Filtre Utiliser/Ignorer, Enreg. modifications, Périodes communes, Créer des objets Météo à partir des Données.Online, Actualiser Online.

Figure 63

Options

Affichage

Lister seulement les "Données pour le Météo-analyser"

Lister toutes les données

Jeu de couleurs pour les graphiques

Données synchrones si écart d'horodatage <= à

5 minute(s)

Modifier

Le bouton *Options* ouvre la fenêtre de la Figure 64 permettant de configurer la présentation.

Figure 64



### Onglet Graphiques

Cet onglet est similaire à celui de l'objet *Météo* avec en plus la possibilité de visualiser les données de plusieurs objets *Météo*, voir Figure 65.

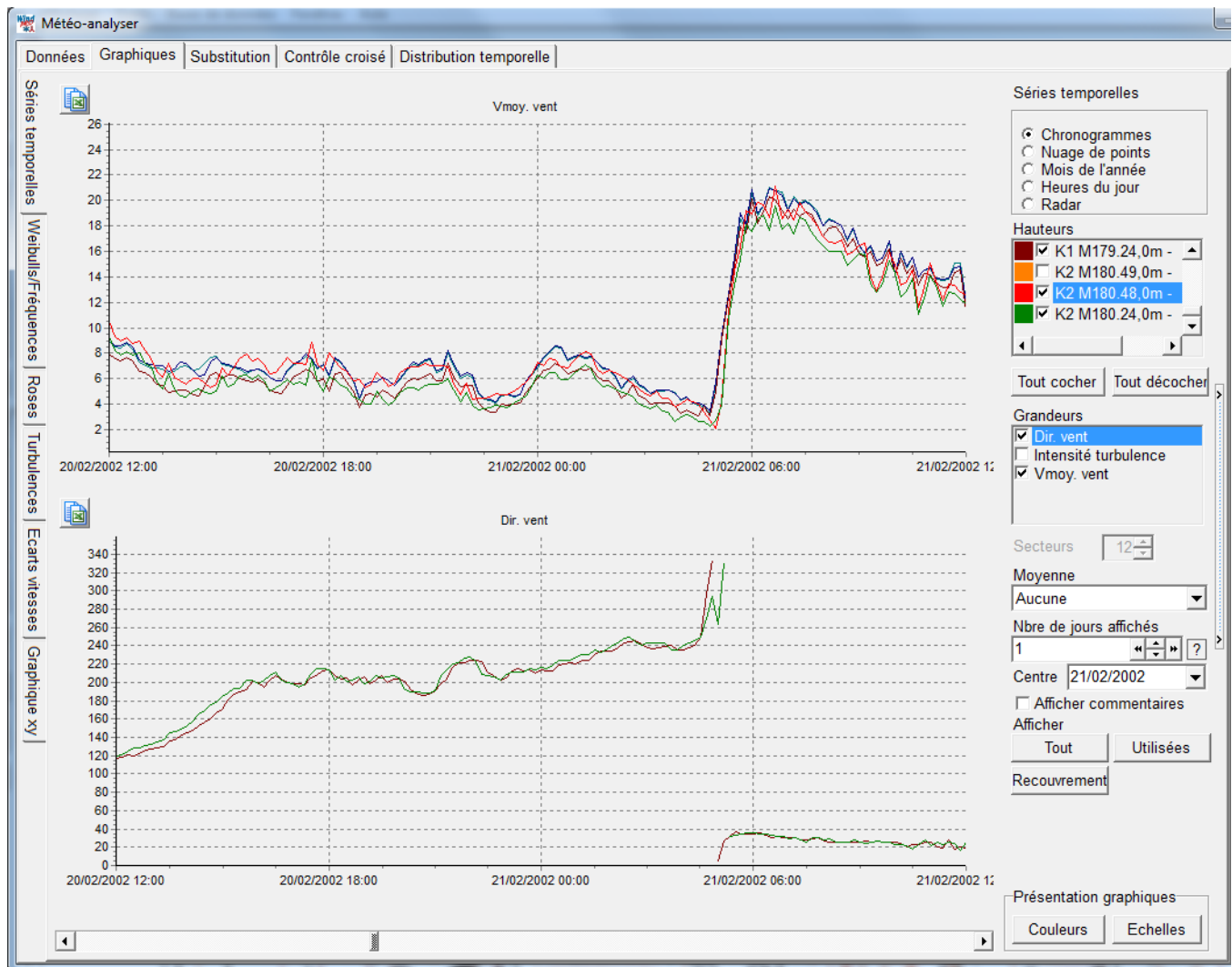


Figure 65

#### 3.3.3.1 Substituer des valeurs dans une série de données

##### Onglet Substitution

Les opérations de substitution se réalisent à partir de cet onglet, voir Figure 66.

Il faut d'abord créer une nouvelle série de données où se feront les opérations de substitution. La création se fait en général à partir de la série à modifier. Le nom de la série de données ainsi créée sera formé par le nom de la série de départ suivi du suffixe *.subst*.

Alternativement, on peut utiliser une série « \*.subst » existante.

Deux manières de faire la substitution sont proposées : *Manuelle* et *Automatique*. Le choix se fait en cliquant sur le bouton du même nom correspondant. Elles sont décrites à la suite.

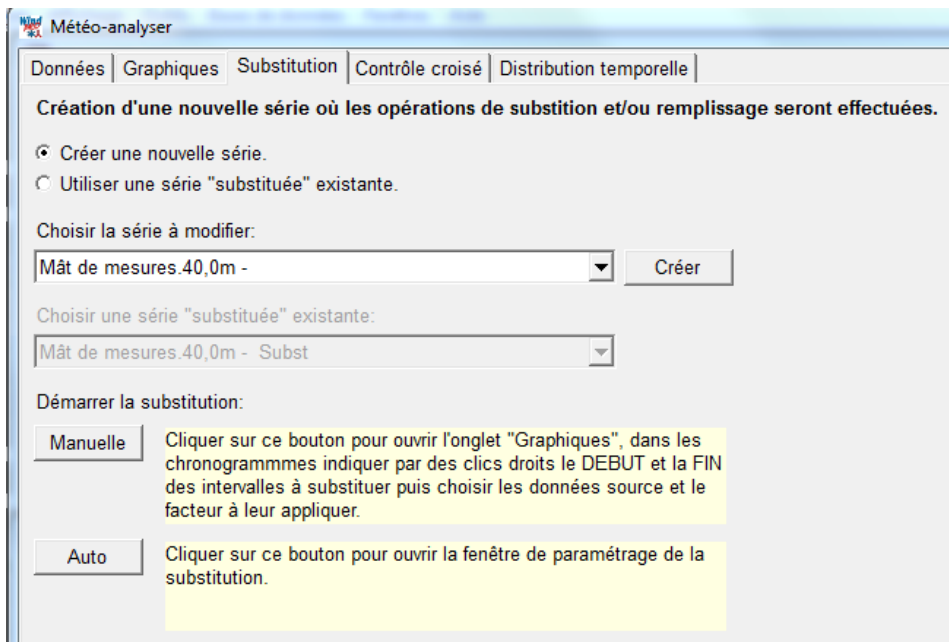


Figure 66

### 1) La substitution **Manuelle** :

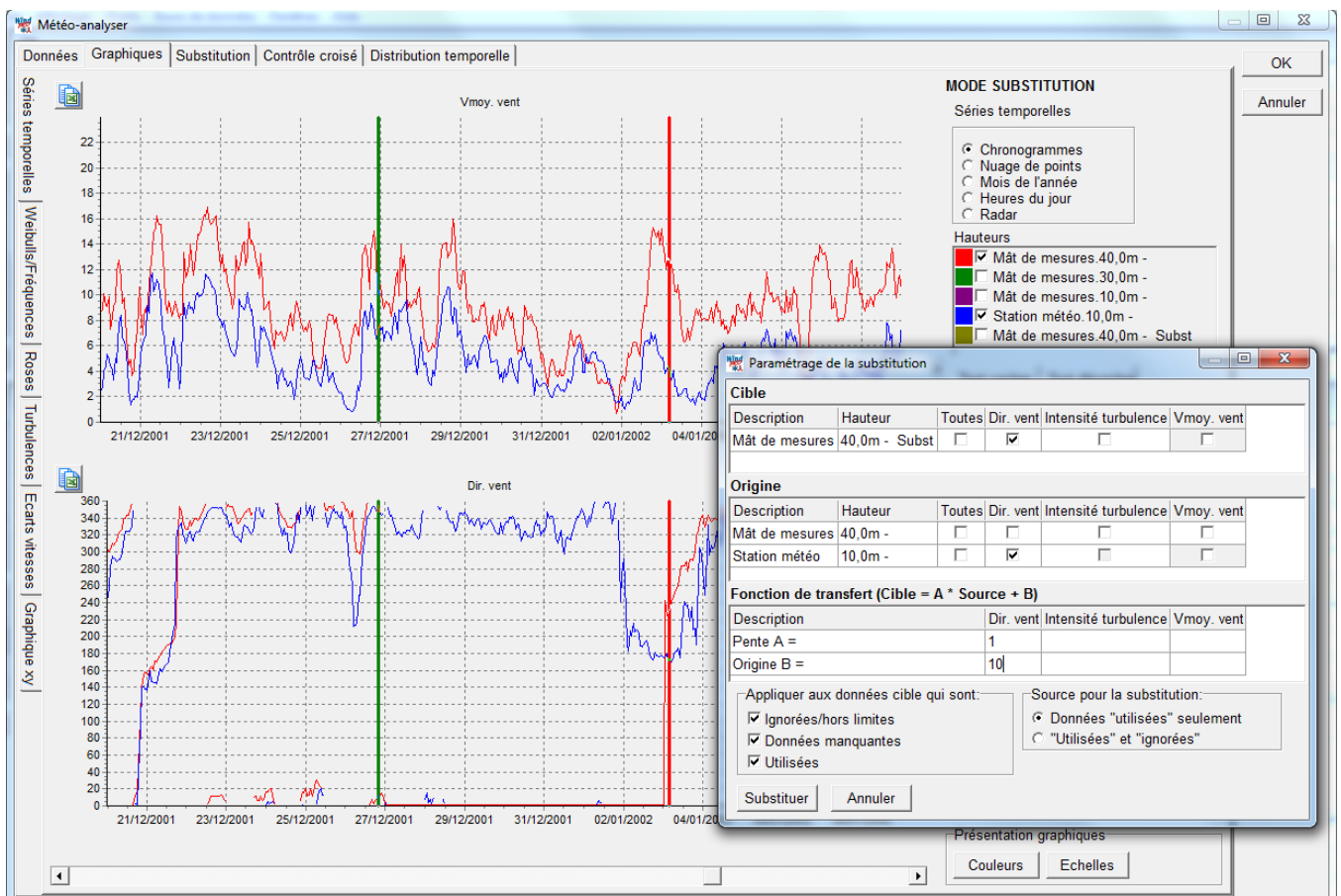


Figure 67

La partie des données à substituer s'indique directement sur le chronogramme en définissant avec la souris le début de l'intervalle et la fin de l'intervalle. Ensuite, il faut ouvrir la fenêtre de *Paramétrage de la substitution* en faisant un clic droit sur le graphique et choisissant *Substituer* dans le menu contextuel.

Dans la fenêtre *Paramétrage de la substitution*, voir Figure 67, s'indiquent les grandeurs *Cible* à substituer, les données *Source* à utiliser et la *Fonction de transfert* qui doit être appliquée.

2) La substitution **Auto** :

**Paramétrage de la substitution**

Cible					
Description	Hauteur	Toutes	Dir. vent	Intensité turbulence	Vmoy. vent
Mât de mesures	40,0m - Subst	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Origine					
Description	Hauteur	Toutes	Dir. vent	Intensité turbulence	Vmoy. vent
Station météo	10,0m -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mât de mesures	40,0m -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mât de mesures	30,0m -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonction de transfert (Cible = A * Source + B)			
Description	Dir. vent	Intensité turbulence	Vmoy. vent
Pente A =	1		
Origine B =	10		

Appliquer aux données cible qui sont:

Ignorées/hors limites  
 Données manquantes  
 Utilisées

Source pour la substitution:

Données "utilisées" seulement  
 "Utilisées" et "ignorées"

Substituer    Annuler

Figure 68

Après avoir cliqué sur bouton *Auto*, la fenêtre *Paramétrage de la substitution* s'ouvre directement, voir Figure 68.

La différence entre les deux méthodes est que le *Paramétrage de la substitution* s'applique seulement à l'intervalle défini graphiquement dans le cas de la méthode *Manuelle* alors qu'il s'applique à toute la série dans le cas de la méthode *Auto*. Par conséquent, il faut d'abord marquer *Ignorées* les données à substituer avant d'appliquer la méthode *Auto*.

### 3.3.3.2 Contrôle croisé des extrapolations verticales et horizontales faites avec WAsP.

#### Onglet *Contrôle croisé*, sous-onglet *Analyse et résultats*

Si on dispose de mesures, sur période commune, issues de plusieurs mâts ou faites à plusieurs hauteurs d'un même mât, la fonction *Contrôle-croisé* permet d'estimer la précision des extrapolations calculées par WAsP. Cette estimation, qui était longue à réaliser avec les outils existants jusqu'à présent, est maintenant obtenue par un simple clic de souris et quelques secondes de patience (le temps que les calculs se fassent !).

L'opération de *Contrôle croisé* se fait dans le sous-onglet *Analyse et résultats*, voir Figure 69, où on peut comparer les vitesses moyennes du vent calculées par rapport à celles effectivement mesurées.

Dans l'exemple présenté à la figure Figure 69 les contrôles suivants ont été effectués :

- Mât 1 : calcul de la vitesse du vent à 49m à partir de la vitesse du vent mesurée sur le mât 2 à 49m, la vitesse calculée est sous-estimée de 0,8% par rapport à la vitesse effectivement mesurée.
- Mât 1 : calcul de la vitesse du vent à 49m à partir de la vitesse du vent mesurée sur le mât 1 à 24m, la vitesse calculée est surestimée de 1,1% par rapport à la vitesse effectivement mesurée.
- Mât 2 : calcul de la vitesse du vent à 49m à partir de la vitesse du vent mesurée sur le mât 1 à 24m, la vitesse calculée est surestimée de 2,4% par rapport à la vitesse effectivement mesurée.

Prévu en :	Description	Hauteur	Hauteur	Translation de hauteur	Objet Données-site	Vitesse vent mesurée	A A [%]	B B [%]	C C [%]	D D [%]	E E [%]	F F [%]
A	Mât 1	49,0m -	49,0	0,0	12 Sectors Données-s	6,79	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B	Mât 1	47,0m -	47,0	0,0	12 Sectors Données-s	6,78	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C	Mât 1	24,0m -	24,0	0,0	12 Sectors Données-s	5,98	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D	Mât 2	49,0m -	49,0	0,0	12 Sectors Données-s	6,45	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2,4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E	Mât 2	48,0m -	48,0	0,0	12 Sectors Données-s	6,48	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
F	Mât 2	24,0m -	24,0	0,0	12 Sectors Données-s	5,67	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Premier relevé: 01/11/2001 00:10:00 | Dernier relevé: 19/10/2002 21:20:00 | Fréquence: 10 mn | Nombre de relevés: 50804 | Mois avec données: 11,6  
 Secteur: 12 | Voir document WindPRO : WAsP Parameters | Modifier les paramètres WAsP  
 Représentation graphique des profils | Présente version de WAsP: WAsP 6-9 | Afficher:  
 les écarts en pourcent  
 les écarts de vitesse  
 les vitesses prévues  
 Note: le temps de calcul s'accroît avec le nb de contrôles  
 Calculer

Figure 69

Le *Contrôle-croisé* est aussi un moyen pratique de comparer toutes les vitesses mesurées sur leur période commune.

Les résultats peuvent être copiés dans le presse-papiers afin d'être collés dans une autre application ; pour cela il faut sélectionner toutes les cellules du tableau, puis appeler le menu contextuel par un clic droit et choisir *Copier*.

Les causes suivantes peuvent être à l'origine de mauvais résultats :

- Les équipements de mesure ont été mal calibrés,
- Les mâts ont été mal placés sur le terrain,
- La description du terrain (rugosités, courbes de niveau et obstacles) est mauvaise,
- La climatologie du vent n'est pas la même aux différents emplacements des mâts (dans ce cas le modèle WAsP n'est pas applicable et les calculs sont par conséquent incorrects), ceci peut être le cas quand un mât est placé à proximité d'une arête montagneuse qui induit des modifications meso-échelle de l'écoulement du vent.
- Les pentes du terrain sont très importantes et provoquent le décollement de la couche limite, ce phénomène n'est pas pris en compte par WAsP et fait partie des limitations connues du modèle.

### Onglet *Contrôle croisé*, sous-onglet *RIX évaluation/correction*

Concernant le dernier point (de la liste précédente), l'institut Risoe du Danemark (éditeur de WAsP) a mis en évidence une relation entre les pentes du terrain et l'erreur introduite par le modèle WAsP lorsqu'il est utilisé sur des terrains dont les pentes excèdent la limite d'application du modèle.

A partir de ce constat, Risoe a développé une méthode, appelée RIX, permettant de corriger les biais introduits par WAsP quand il est utilisé dans ces conditions. Cette méthode permet de calculer un facteur de correction de la vitesse du vent qui est fonction des pentes du terrain.

Si dans le sous-onglet *Analyse et résultats* apparaissent des écarts anormaux entre les valeurs calculées et les valeurs effectivement mesurées et que vous pensez qu'ils sont dus à des pentes excessives, vous pouvez vérifier cette hypothèse dans l'onglet *RIX évaluation/correction* et, si elle est vraie, extraire le facteur de correction à appliquer. Le facteur de correction s'appelle *Alpha* et s'utilise avec le module PERTES & INCERTITUDES pour faire les corrections automatiquement, voir Figure 70.

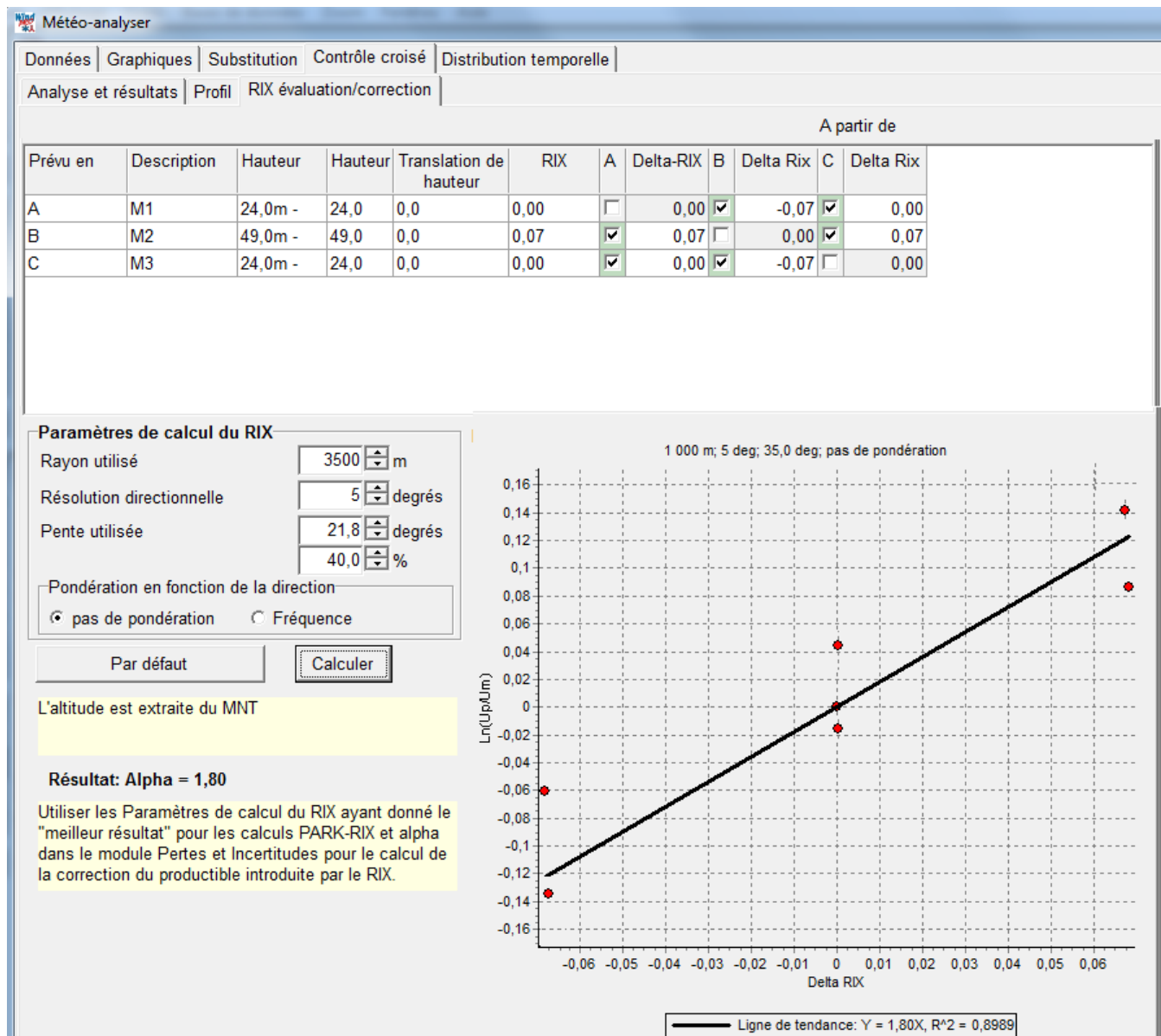


Figure 70

Dans l'exemple de la Figure 70, il y a trois mâts de mesure dont les résultats du contrôle croisé sont mauvais. On peut vérifier dans l'onglet *RIX évaluation/correction* si les pentes du terrain sont en cause.

A cet effet, le *Météo-analyser* calcule les pentes autour de chaque mât et le résultat s'appelle le RIX. Si la valeur du RIX est  $> 0$  alors les pentes sont excessives.

Ensuite le *Météo-analyser* calcule le Delta RIX qui est la différence de « pente » entre l'emplacement du mât utilisé pour la prévision et l'emplacement du mât objet de la prévision.

Enfin, les écarts entre les vitesses du vent calculées et mesurées sont reportés sur le graphique de la Figure 70 en fonction du Delta RIX. Si les points sont raisonnablement alignés on peut dire qu'il y a corrélation entre les écarts de vitesse et les pentes du terrain et donc que les erreurs sont dues à WASP qui est utilisé hors de son domaine d'application.

Dans ces conditions, le facteur *Alpha* calculé pourra être utilisé pour corriger les résultats produits par WASP sur ce terrain quand les pentes sont excessives.

Pour plus d'information sur la méthode RIX reportez-vous au 3.4.0.2 de cette section et à la section 12 PERTES et INCERTITUDES.



Onglet *Contrôle croisé*, sous-onglet *Profil*

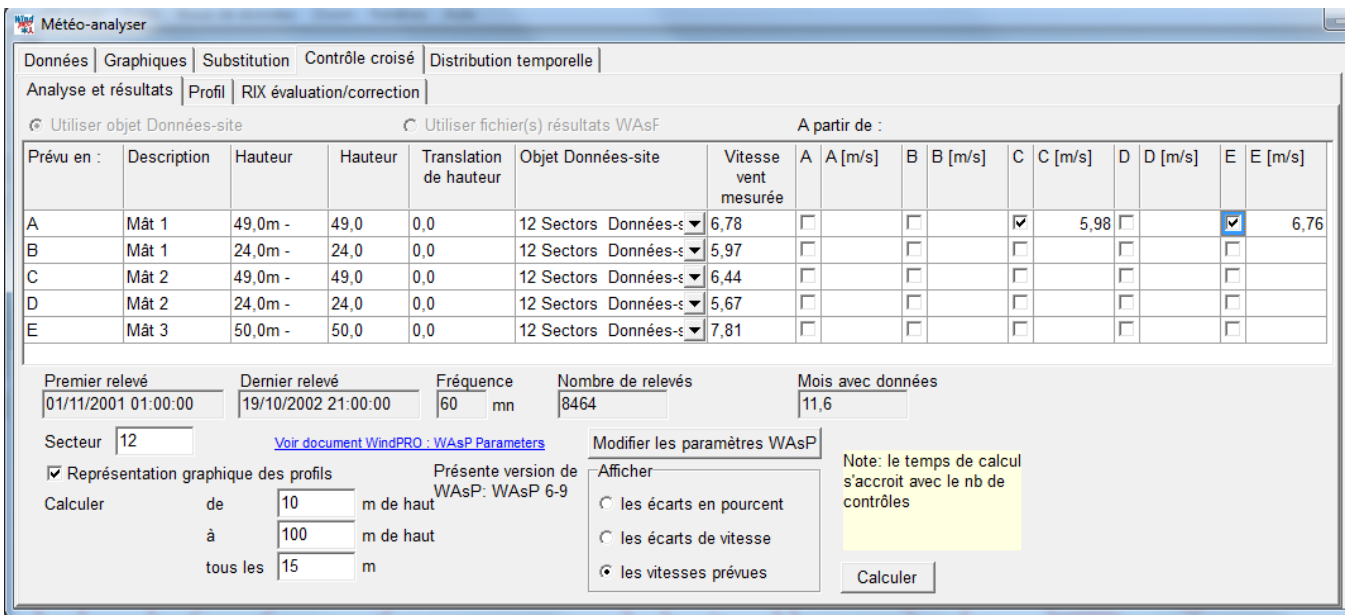


Figure 71

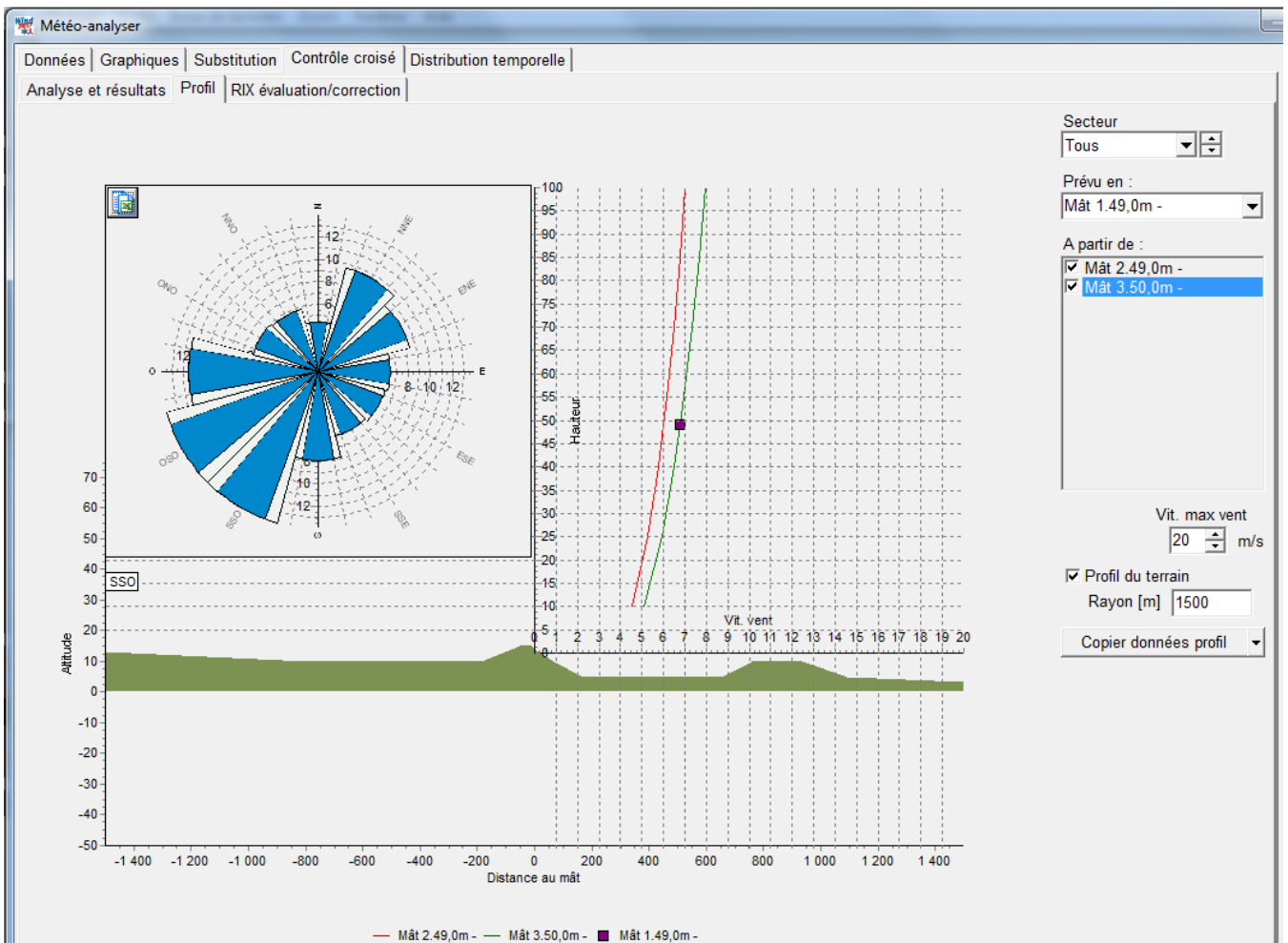


Figure 72

La Figure 71 montre :

- la vitesse du vent mesurée à 49m de hauteur sur le mât 1 -> 6,78m/s
- la vitesse du vent calculée à 49m de hauteur sur le mât 1 -> 5,98m/s à partir de la vitesse mesurée sur le mât 2 à 49m de hauteur
- la vitesse du vent calculée à 49m de hauteur sur le mât 1 -> 6,76m/s à partir de la vitesse mesurée sur le mât 3 à 50m de hauteur

En cochant l'option *Représentation graphique des profils* on peut visualiser dans le sous-onglet *Profil* les profils verticaux du vent, en l'occurrence les profils à l'emplacement du mât 1 calculés respectivement à partir de la mesure du vent à 49m sur le mât 2 et de la mesure du vent à 50m sur le mât 3, voir Figure 72.

### 3.3.3.3 Génération d'une Distribution temporelle

Cette outil a été introduit en même temps que le module PERTES et INCERTITUDES. En effet, l'estimation de certaines pertes requiert des données météorologiques sous forme de série temporelles couvrant exactement une année avec une périodicité suffisamment élevée. La mise en œuvre de cet outil se fait dans l'onglet *Distribution temporelle*, voir Figure 73.

Cet outil génère des séries temporelles avec les caractéristiques requises pour certains calculs avec les modules PARK et PERTES & INCERTITUDES, à savoir une durée de 1 an et une résolution élevée. Ces séries peuvent être générées à partir de données pouvant provenir de différents objets Météo. L'outil fonctionne de la manière suivante :

Toutes les données utilisables de la 1ère série de la liste sont employées pour générer la nouvelle série définie par sa date de début et par sa fréquence. Les "trous" de cette nouvelle série sont ensuite comblés à partir des données de la 2ème série de la liste, puis de la 3ème etc.

Si, néanmoins, il subsiste des "trous", le remplissage se fait de la manière suivante :

- les données manquantes sont introduites par une simple interpolation effectuée à partir de la dernière valeur avant le "trou" et de la première après le "trou". Cette méthode ne peut s'appliquer raisonnablement que pour des "trous" de moins de 8 heures (fonction des données).
- pour des "trous" plus importants, afin de restituer la dynamique des variations, le remplissage se fait en collant la période la plus proche. C'est la plus simple des méthodes raisonnables. Vous pouvez aussi améliorer les données de départ en les retravaillant avec l'outil de substitution.

Sélectionner les séries à utiliser pour la génération :

Mât de mesures 30,0m -  
**Mât de mesures 10,0m -**  
 MERRA 50,0m -

Ajouter

**REMARQUE :** avec PARK la série générée s'utilise comme un indice qui s'applique au productible du parc pour établir ses variations au cours de l'année. Elle est ajustée pour que le productible annuel original reste le même, par conséquent, pour ce type d'usage les valeurs absolues de la série ne requièrent pas la précision exigée pour un calcul de productible.

Séries de données sélectionnées :

Nom	1ère donnée	Der. donnée	Mois	Fréquence (mn)
Mât de mesures 40,0m -	01/07/2001	30/06/2002	11	60
Station météo 10,0m -	01/07/1993	01/07/2004	132	60

Grandeurs à inclure :

Vit. vent  
 Dir. vent  
 Intensité turbulence

Définition de la période :

Début : 01/07/2001  
 Fin : 01/07/2002  
 Fréquence : 10 mn  
 Données synchrones si écart d'horodatage <= à : 50 %

Outils d'évaluation :

Disponibilité des données

Traitement des données :

Ajouter aux directions : 0 Degrés  
 Augmenter la fréquence et combler par interpolation linéaire les "trous" < à 8 heures  
 "Trous" plus grands comblés en collant la période la plus proche

Résultat :

Nom de fichier auto.  
 D:\WindPRO Data\VENT et PRODUCTIBLES\Mât de mesures Parcourir  
 Nom fichier auto  
 Afficher la distribution 24-12  
 Calculer / Enregistrer

Figure 73

Par exemple, pour estimer les pertes dues à l'arrêt des machines quand la température est inférieure à -20°C, il est nécessaire de disposer de mesures de vent et de relevés de température avec une périodicité de 1 heure raisonnablement. Il se peut que vous n'ayez pas fait de mesure des températures, mais que vous puissiez disposer des relevés d'une station météo voisine dont la périodicité des données est seulement d'une toutes les 3 heures. En utilisant l'outil *Distribution temporelle* vous pourrez transformer la série de températures tri-horaires en

série de températures horaires qui sera utilisée en conjonction avec la série horaire des mesures de la vitesse du vent pour estimer les pertes annuelles dues à l'arrêt des machines quand la température est inférieure à -20°C.

L'introduction de cet outil a été mis à profit pour enrichir les calculs PARK avec l'estimation de la distribution annuelle de la puissance d'un parc et l'estimation de la production en fonction de la période de l'année et du moment de la journée.

La génération d'une *Distribution temporelle* se fait toujours à partir de séries existantes. Les trois méthodes suivantes sont combinées pour générer les données manquantes :

- Utilisation de données alternatives provenant d'un autre mât de mesure, d'une station météo, etc. NOTE : dans ce cas les données alternatives doivent être mises à la bonne échelle préalablement.
- Remplissage des trous par des interpolations linéaires.
- Remplissage des trous en recopiant les données d'une période adjacente (quand les trous sont très grands).

La série résultante est un fichier caractérisé par son suffixe .WTI (Wind Time Variation) qui est enregistré dans le dossier du projet.

Si une série .WTI est utilisée pour les calculs avec PARK, la vitesse moyenne du vent sera ajustée pour que le productible résultant soit identique à celui du calcul originel, la série n'ayant qu'un rôle d'indice à partir duquel sont déterminées les variations du productible au cours de l'année.

---

### 3.3.4 Entrées des données pour un calcul PARK

Pour effectuer un calcul ATLAS, METEO ou WASP Interface, il n'est pas nécessaire de créer des objets *Eolienne*. Les types d'éolienne et leur hauteur de moyeu se choisissent directement dans la fenêtre de paramétrage du calcul.

Par contre, pour effectuer un calcul PARK il est indispensable de créer les objets *Eolienne* et de les positionner sur la carte. En effet, PARK a besoin de connaître la position et le type de chaque éolienne pour calculer les sillages aérodynamiques et leurs effets.

Si le parc éolien est très étendu, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs objets *Données-site* ou *Météo*. Dans ce cas, chaque objet *Eolienne* utilisera l'objet qui lui sera assigné (par défaut les éoliennes utilisent l'objet le plus proche).

La description du terrain par des courbes de niveau, des lignes de rugosité et des obstacles est la meilleure méthode. Elle permet, avec WASP, de calculer l'influence du terrain spécifiquement à l'emplacement de chaque éolienne du parc.

Si, dans l'usage de l'objet *Données-site*, vous avez coché l'option pour *Calcul de productibles avec WASP et ATLAS*, le calcul PARK lancera un calcul avec WASP, pour forcer l'usage d'ATLAS vous devez cocher l'option *Calculs de productibles avec ATLAS*.

Voir 3.4.0 pour la description du paramétrage des calculs avec PARK.

## 3.4 Calculs et rapports



Une fois que tous les objets nécessaires sont en place, passez à la fenêtre *Calculs et rapports* de la Figure 74, en cliquant, par exemple, sur le bouton *Calculs et rapports* ci-contre.

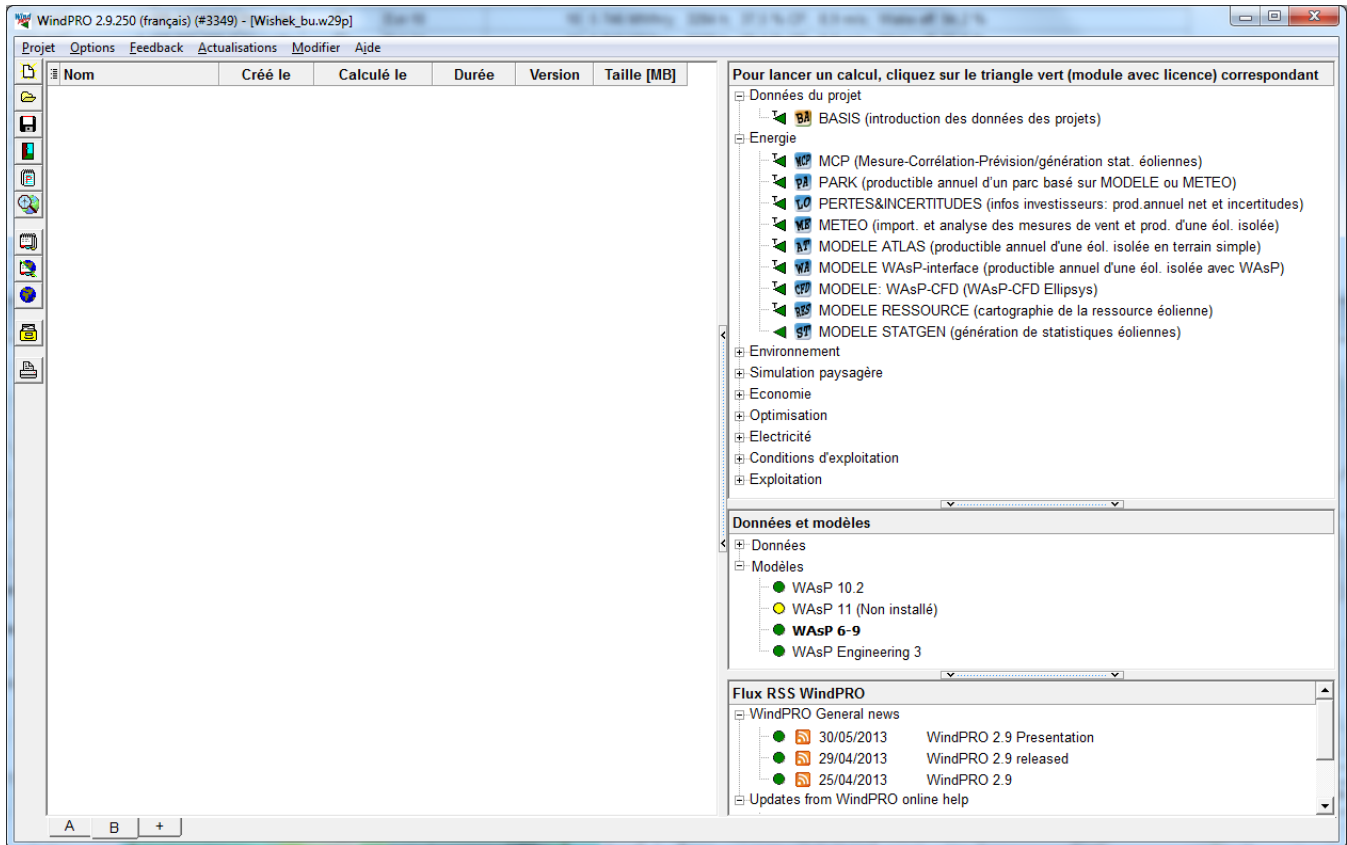


Figure 74

Pour lancer un calcul, cliquez sur le bouton vert, en forme de flèche, correspondant au calcul souhaité.

REMARQUES : une flèche de couleur jaune indique que vous n'avez pas de licence pour le module de calcul correspondant. Dans ce cas, le module fonctionne en mode DEMO (possibilité d'afficher et d'imprimer des rapports existants, d'entrer des données, mais impossibilité de calculer et d'enregistrer). Les modules dont la flèche est précédée du T ont une licence à durée limitée. Voir Figure 74.

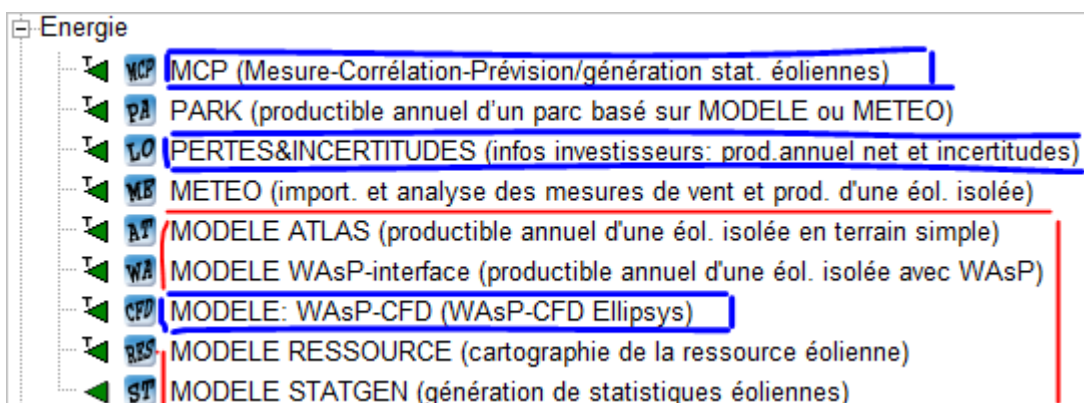


Figure 75

La Figure 75 montre tous les modules se rapportant à l' «énergie » :

- Les modules dans un cadre bleu MCP, PERTES&INCERTITUDES et WAsP-CFD sont documentés dans des sections séparées.
- Les modules dans le cadre rouge sont vendus en bloc sous le nom MODELES.  
Notes : STATGEN n'est activé si vous avez les licences pour MODELES et METEO. WAsP-CFD requiert une version 11 ou supérieure de WAsP et nécessite l'achat de « bons » de calcul.
- Le chapitre 3.6. de la présente section est spécifiquement dédié au module RESSOURCE.

Note : le module OPTIMISATION n'est pas inclus dans le groupe *Energie*, car il sert aussi à l'optimisation des bridages des éoliennes quand il y a des contraintes de bruit maximal à respecter.

La description des calculs et rapports commence par ceux se rapportant au module PARK et se poursuit par ceux se rapportant aux autres modules, dont l'usage est plus spécifique. Cet ordre reprend la séquence habituelle d'une étude de productible.

### 3.4.0 Calculs avec PARK (productible annuel d'un parc éolien, RIX, etc.)

Au lancement de PARK la fenêtre de paramétrage du calcul s'ouvre à l'onglet *Principal*, voir Figure 76, où se fait le choix des calculs :

- *Productible annuel*, pour effectuer ce calcul il faut des objets *Eoliennes* positionnés sur les cartes du projet et des objets *Météo* ou *Données-site* (quand WAsP est utilisé),
- *Distribution du productible annuel*, ce calcul nécessite un objet *Météo* contenant des données sous forme de séries temporelles ou un fichier .WTI (voir 3.3.3.3),
- *RIX (Ruggedness IndeX)*, ce calcul nécessite un objet *Données-lignes* avec des courbes de niveau ou un objet *Maille-altimétrique* pour le calcul du MNT.

Activer les options avancées ouvre des possibilités de paramétrage supplémentaires.

#### 3.4.0.0 Calcul du Productible annuel

Onglet *Principal*, voir Figure 76.

Figure 76



**Sillages :**

La *Constante du sillage* (Wake Decay Constant en anglais) définit la manière dont se développe la traînée aérodynamique en aval d'une éolienne. Par défaut, elle est égale à 0,075 ce qui traduit un accroissement du rayon du cône formé par le sillage de 7,5 cm par mètre en aval de l'éolienne.

Zone agricole d'aspect ouvert WDC: 0,075	▼
Offshore & plans d'eaux WDC: 0,040	
Zone agricole d'aspect ouvert WDC: 0,075	
Zone agricole d'aspect très fermé WDC: 0,100	

Le menu permet de choisir d'autres valeurs typiques, voir ci-contre.

Si *Activer les options avancées* est cochée d'autres possibilités sont proposées.

En offshore la *Constante du sillage* est plus faible, le cône du sillage est moins ouvert, la réduction de la vitesse du vent dans le sillage est plus importante et par conséquent les pertes induites par les effets des sillages sont plus importantes.

**Options relatives aux résultats présentés dans le rapport :**

- *Hauteur valeurs témoins* : la vitesse moyenne et l'énergie du vent sont données à cette hauteur à l'emplacement de l'objet *Données-site* ainsi que la rugosité équivalente.
- *Aire-parc à présenter sur la carte* : si plusieurs objets *Aire-parc* ont été créés, ce menu permet de choisir celui dont les polygones seront présentés sur la carte du rapport.
- *Traitement des pertes et des incertitudes* : il est recommandé d'utiliser le module PERTES et INCERTITUDES pour traiter ces composantes essentielles d'un projet. En phase d'évaluation la *Présentation du productible BRUT et des pertes dues aux sillages* peut être suffisante ; vous pouvez, aussi, estimer globalement les pertes et les incertitudes et les présenter sous forme d'une *Réduction arbitraire* exprimée en % du productible avec un libellé de votre choix.

Onglet *Eoliennes*, voir Figure 77.

C'est dans l'onglet *Eoliennes* que l'on sélectionne les machines qui doivent être prises en compte pour le calcul, par défaut, seules les éoliennes des calques visibles sont sélectionnées.

Pour modifier la sélection, vous avez la possibilité de sélectionner les calques dans le cadre supérieur *Calques*.

Vous avez également la possibilité de sélectionner les éoliennes une par une en décochant les options du cadre *Utiliser tous les objets des calques sélectionnés*, comme montré dans la copie d'écran de la Figure 77.

Figure 77

Quand plusieurs objets *Météo* et/ou *Données-site* ont été définis, l'option *Définir pour chaque éolienne les données de vent à utiliser* fait apparaître un nouvel onglet appelé *Liens éoliennes-données de vent* qui permet de choisir les données de vent à appliquer à chaque éolienne pour le calcul du productible, voir Figure 78.  
 Note : seules les données sélectionnées dans l'onglet *Données de vent* seront proposées.

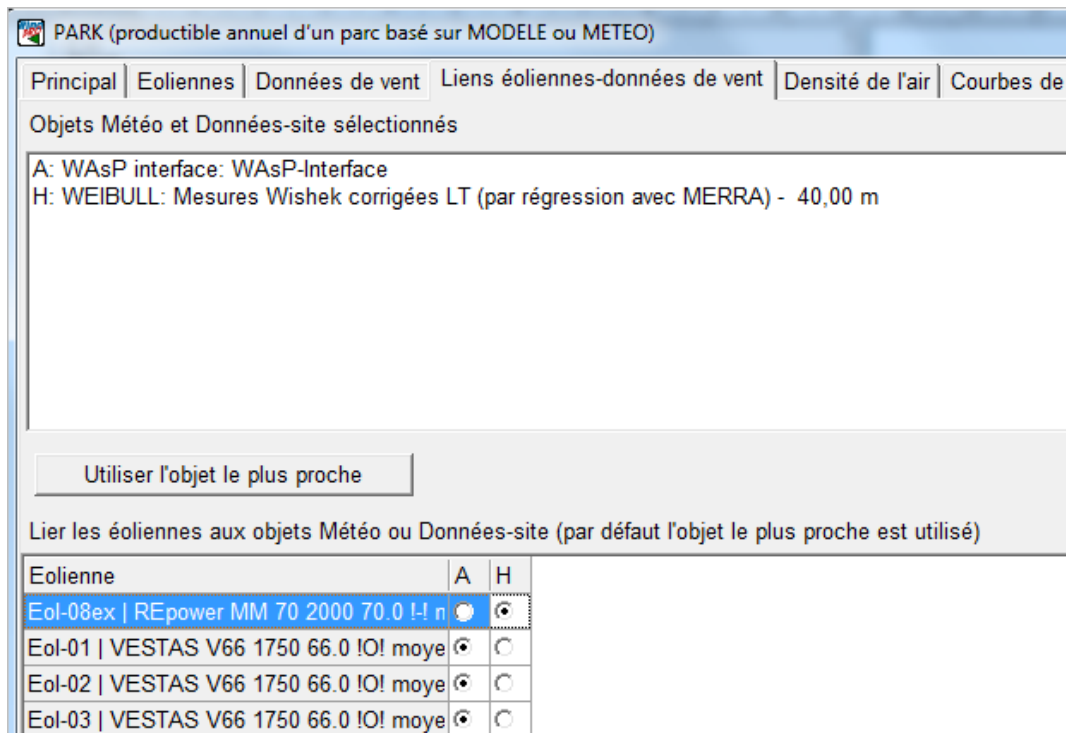
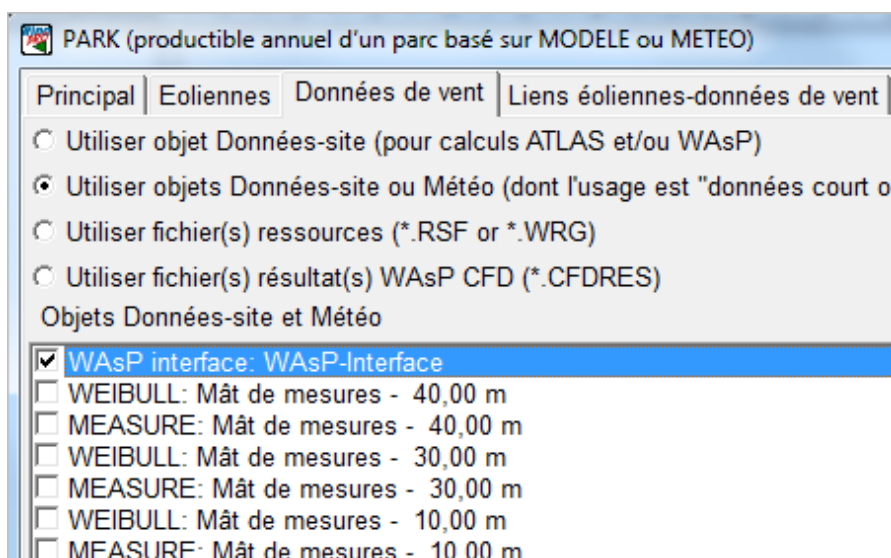


Figure 78

Si une *Translation de hauteur* a été introduite dans les *Propriétés de l'objet Eolienne*, la hauteur de moyeu est réduite automatiquement de la valeur de la translation. Dans le rapport apparaîtront la hauteur de moyeu de l'éolienne ainsi que la valeur de la translation appliquée.

La *Translation de hauteur* est typiquement utilisée quand les éoliennes sont implantées en forêt pour rendre compte du soulèvement de l'écoulement par la forêt.

**Onglet *Données de vent***, voir Figure 79.



C'est dans cet onglet qu'on choisit la/les source(s) des données de vent à utiliser pour le calcul PARK.

PARK peut utiliser :

- des *statistiques éoliennes* via des objets *Données-site*,
- des mesures de vent via des objets *Météo*,
- des fichiers ressources au format WindPRO ou WAsP (\*.RSF ou \*.WRG),
- des fichiers ressources produits par WAsP-CFD (\*.CFDRES).

Figure 79

Onglet **Courbes de puissance**, voir Figure 80.

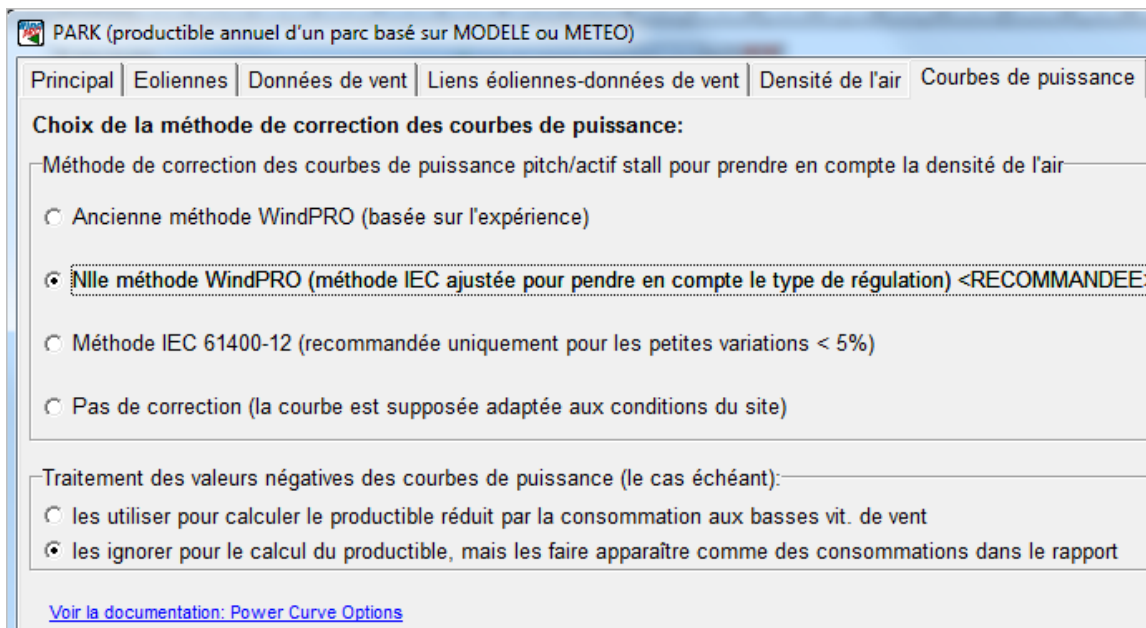


Figure 80

#### 1) Cadre *Méthode de correction des courbes de puissance...* :

Normalement, dans la *Bibliothèque d'éoliennes* de WindPRO, les courbes de puissance sont données à la densité standard de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup>) et elles sont recalculées à la densité de l'air du site étudié.

On peut, aussi, entrer dans la *Bibliothèque d'éoliennes* la courbe de puissance d'une éolienne pour la densité de l'air du site étudié et dans ce cas il faudra cocher l'option *Pas de correction*. Alternativement, pour pouvez laisser l'option cochée par défaut *Nulle méthode WindPRO...<RECOMMANDEE>* et dans l'onglet *Densité de l'air* forcer la densité de l'air à la même valeur que celle donnée pour la courbe de puissance afin qu'aucune correction ne soit faite.

Pour des informations supplémentaires sur les méthodes de correction cliquez sur l'hyperlien *Voir la documentation : Power Curve Options*.

#### 2) Cadre *Traitement des valeurs négatives des courbes de puissance* :

Certaines courbes de puissance présentent des valeurs négatives dans l'intervalle de 0 m/s à environ 4 m/s, mais la plupart du temps elles présentent une valeur égale à zéro dans cet intervalle.

Deux traitements des valeurs négatives sont proposés :

- *Les utiliser pour calculer le productible réduit par la consommation aux basses vitesses de vent*, qui est l'option cochée par défaut. Les valeurs négatives correspondent à la consommation propre de l'éolienne.
- *Les ignorer pour le calcul du productible, mais les faire apparaître comme des consommations dans le rapport*, cette option est utile pour faire une analyse financière très fine quand le prix du kWh acheté est sensiblement supérieur au prix du kWh vendu.

Onglet *Densité de l'air*, voir Figure 81

PARK (productible annuel d'un parc basé sur MODELE ou METEO)

Principal | Eoliennes | Données de vent | Liens éoliennes-données de vent | **Densité de l'air** | Courbes de puissance

Options pour le calcul de la densité :

Calcul au niveau de chaque éol. (alt = MNT+ haut. moyen)

Modèle générique f(latitude, altitude)

Données de la BD climatiques **BD climatiques** Station : LISBON

Utiliser la densité STANDARD

Entrée manuelle  Entrez directement la densité

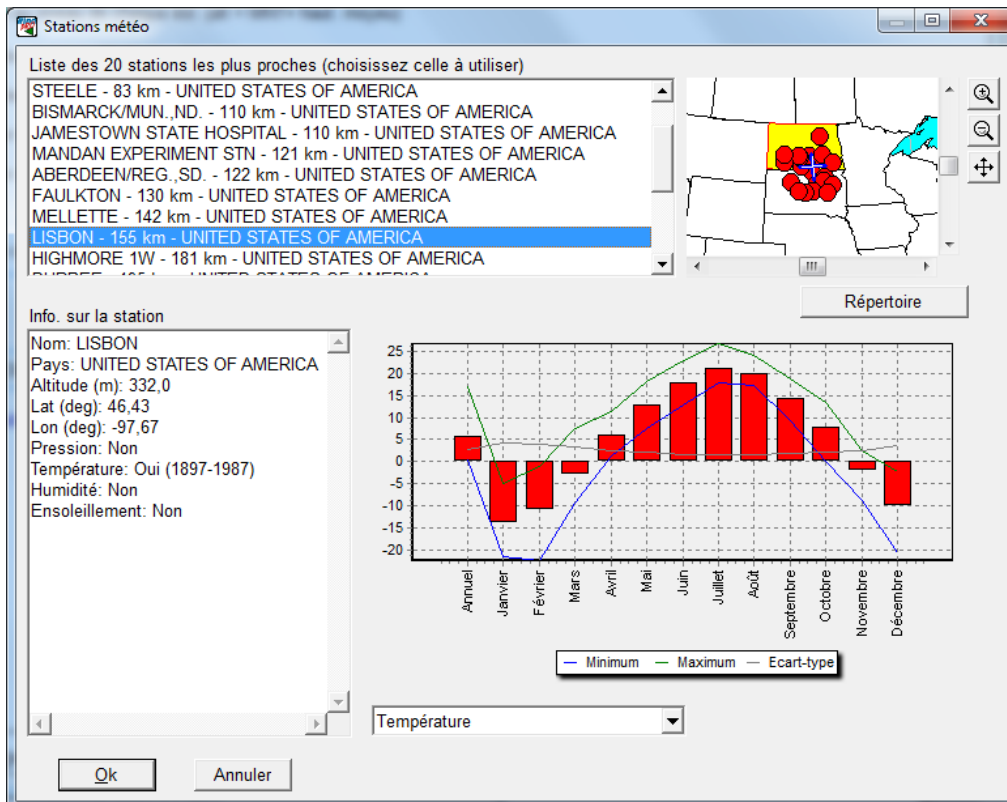
Altitude site  m Tp° site  °C Densité air  kg/m³

RESULTAT:  % du STANDARD

[Voir la documentation : WindPRO Air Density](#)

Figure 81

Par défaut, les options *Calcul au niveau de chaque éol.* et *Données de la BD climatiques* sont cochées ; avec ces options la densité de l'air est calculée automatiquement pour chaque éolienne individuellement à partir de l'altitude des moyeux et de la température donnée par la station météo, de la base de données climatiques de WindPRO, la plus proche du site.



Nous recommandons l'utilisation de cette méthode, mais vérifiez toujours que les données de la station météo sont pertinentes en cliquant sur le bouton *BD climatiques*, voir Figure 82.

Il est important que les données d'altitude et de température soient correctes.

Figure 82

Paramétrage de la densité de l'air

Méthodes et entrées pour le calcul de la densité de l'air  
 Si "Calcul pour chaque éol..." est cochée, le résultat n'est qu'un exemple.

Altitude du site

Auto  
 Entrée manuelle

Données climatiques

Auto f(altitude, latitude)  
 De la BD climatiques BD climatiques  
 Entrez la  $tp^{\circ}$  à l'altitude de référence  
 Entrez la  $tp^{\circ}$  à l'altitude du site

Paramètres avancés (ajustés automatiquement si les données de la BD climatiques sont utilisées)

	Référence	Site	
Altitude	332	733	mètres
Température	5,7	3,1	°C
Gradient		0,650	°C per 100 m
Pression	973,00	926,15	hPa
Humidité	0,000	0,000	Humidité relative [%]
Densité	1,216	1,168	kg/m <sup>3</sup>

Options du modèle standard

Altitude du modèle standard  
 Température du modèle standard  
 Gradient vertical de  $tp^{\circ}$  du modèle standard  
 Pression du modèle standard  
 Humidité du modèle standard

Evaluation

Résultat en pourcent de la densité standard de l'air : 95,3 %

Note: le prod. est quasi proport. à la densité à cond. vent ident.

Fonctionnement

L'altitude de référence fixe la  $tp^{\circ}$  et la pression (BD climatiques ou entrées par l'utilisateur) à partir desquelles seront calculées la  $tp^{\circ}$  et la pression à l'emplacement du site en utilisant le modèle standard (dont le gradient vertical de  $tp^{\circ}$  peut être modifié). Les pressions de la BD climatiques n'étant pas très fiables, il est préférable d'utiliser le modèle standard pour le calcul de la pression, en particulier si la mesure sur site infirme la valeur de la BD. Le taux d'humidité est, par défaut, fixé à 0; son influence est très mineure comme le montre le graphique.

Afficher graphique >>>

OK Annuler

Eventuellement vérifiez, dans la fenêtre *Paramétrage de la densité de l'air*, comment se fait la transposition de la station météo de *Référence* au *Site*, voir Figure 83. Pour afficher cette fenêtre cliquez sur le bouton *Méthode avancée*.

Note : dans cette fenêtre l'*Altitude* du *Site* est celle de l'objet *Centre du site* à laquelle on ajoute la *Hauteur témoin* (50m par défaut) définie dans l'onglet *Principal*.

Figure 83

Dans l'exemple Figure 83, la station météo de *Référence* est située à 332m d'altitude et le *Site* à 733m ; la *Température* et la *Pression* atmosphérique à la station de *Référence* sont de 5,7°C et 973 hPa et transposées au niveau du *Site* elles deviennent 3,1°C et 926,15 hPa ; la *Densité* de l'air résultante, au niveau du *Site* est de 1,168 kg/m<sup>3</sup>.

La *Densité* de l'air à la station météo de *Référence* est environ 4% plus élevée qu'à l'altitude du *Site* et, par conséquent, l'utilisation directe de ces données aurait donné un productible annuel surestimé de 4%.

Dans le cadre *Evaluation*, la valeur 95,3%, donnée dans le champ *Résultat en pourcent de la densité standard de l'air*, indique que la densité de l'air du site est 4,7% inférieure à la densité standard de l'air (niveau de la mer et 15°C) et par conséquent un productible annuel inférieur de 4,7% par rapport aux conditions standards dans lesquelles sont calculées les courbes de puissance.

Pour plus d'informations cliquez sur l'hyperlien *Voir la documentation : WindPRO Air Density*.



### 3.4.0.1 Calcul de la Distribution du productible annuel

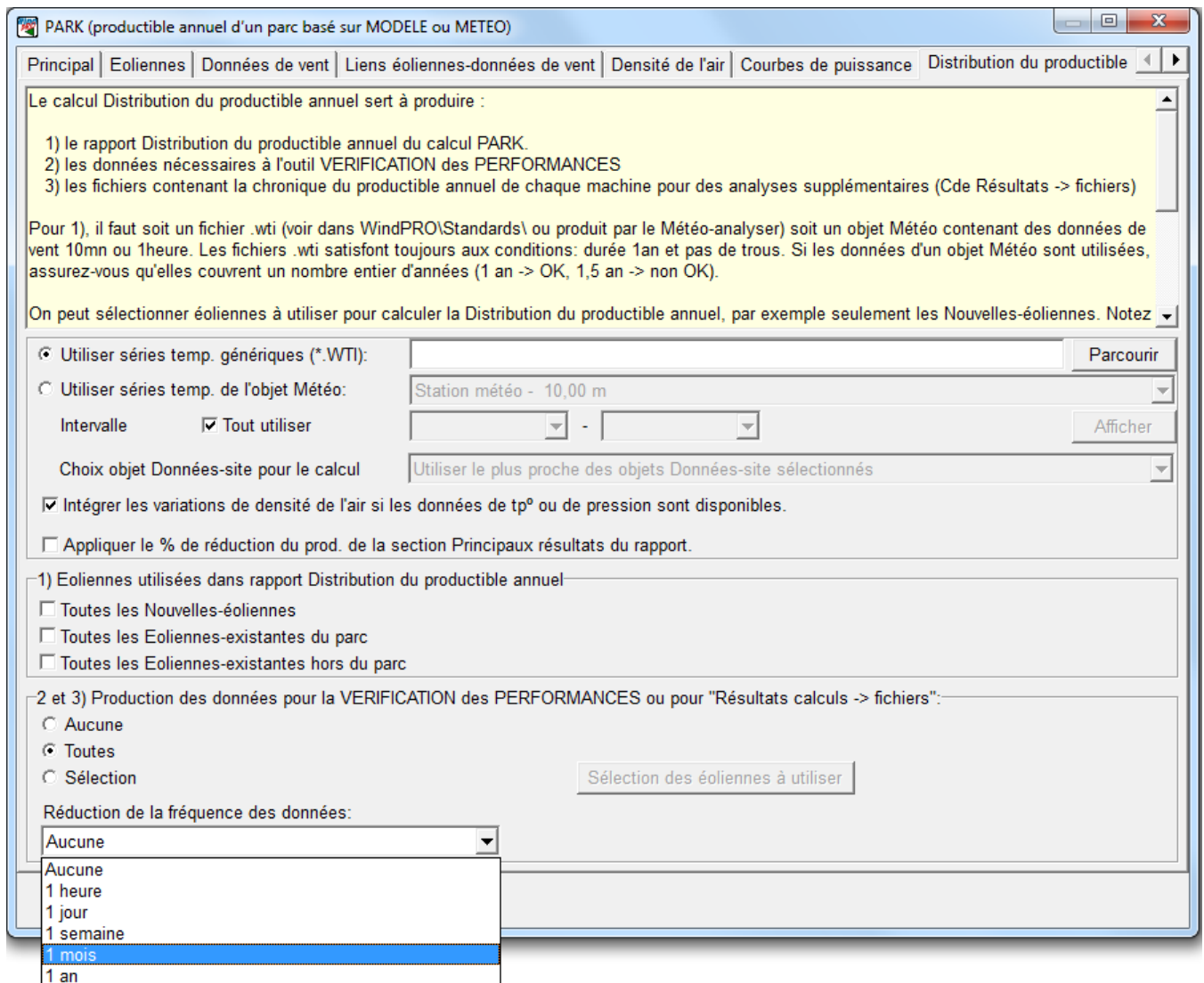


Figure 84

Les principaux produits de ce calcul sont :

**1) Le rapport Distribution du productible annuel** qui présente :

- La distribution statistique du productible annuel du parc étudié, sous forme d'une table 12-24 donnant pour chaque mois de l'année le productible de chaque heure de la journée. Elle permet aux intervenants du marché libre de l'électricité, où le tarif est variable, d'affiner le calcul prévisionnel de leurs revenus.
- La distribution statistique, au cours d'une année, de la puissance du parc étudié. Elle permet de calculer le nombre optimal d'éoliennes dans le cas où la puissance de raccordement est limitée.

**2) Les données nécessaires à l'outil VERIFICATION des PERFORMANCES** qui requiert le productible annuel de chaque éolienne sous forme de série temporelle. Pour une information détaillée reportez-vous à la section 14.

**3) Le fichier contenant les distributions du productible annuel des éoliennes sous forme de séries temporelles** (pour effectuer des analyses supplémentaires). Sa génération se fait avec la commande *Résultats calcul -> fichiers*.

1) fait partie du rapport standard produit par le calcul PARK.

2) dans l'outil VERIFICATION des PERFORMANCES on indique le calcul PARK à utiliser, l'outil se charge d'extraire automatiquement les données.

3) les séries temporelles produites peuvent être collées dans le presse-papiers ou exportées sous forme de fichier texte pour leur utilisation ultérieure avec Excel par exemple.

Comme la quantité de données produites peut être extrêmement importante, par défaut, la commande *Résultats calcul* -> *fichiers* génère uniquement la série de la distribution annuelle du productible du parc.

La génération des séries individuelles pour toutes ou partie éoliennes se fait avec les options *Toutes* et *Sélection*. La Figure 86 montre un exemple dans le cas où 2 éoliennes ont été sélectionnées.

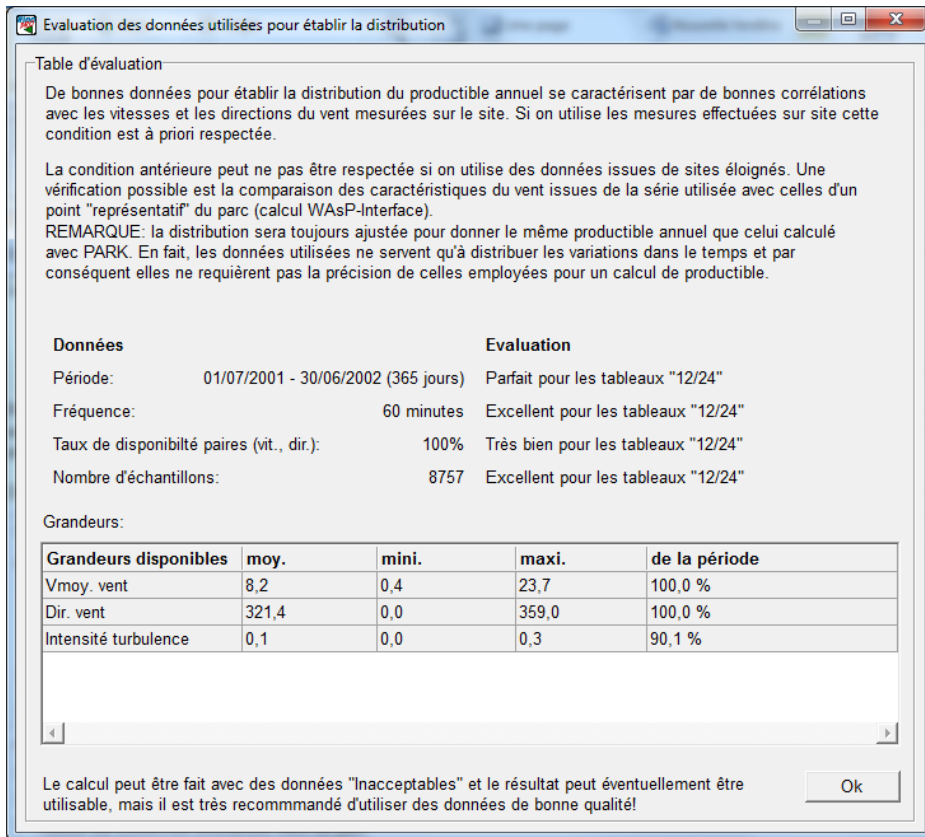
Le menu *Réduction de la fréquence des données* permet de réduire la résolution des séries produites afin de réduire leur poids mais surtout pour faire coïncider leur résolution avec celle des données de production (mensuelle en général) quand elles doivent être utilisées avec VERIFICATION des PERFORMANCES.

NOTE : afin de ne pas créer de confusion, les séries sont ajustées afin que le productible annuel résultant soit identique à celui donné par le calcul PARK standard.

Par contre, les puissances indiquées dans le fichier produit par *Résultats calcul* -> *fichiers* (colonne *Power*, voir Figure 86), ne sont pas ajustées car elles nous paraissent mieux adaptées en l'état à leur utilisation par l'outil VERIFICATION des PERFORMANCES.

Option *Utiliser séries temporelles génériques (\*.WTI)* : la série \*.WTI sert à produire une série d'indices d'énergie du vent à partir desquels sont produites les séries donnant la distribution du productible annuel de chaque éolienne (les séries sont ajustées pour donner les mêmes productibles annuel que ceux donnés par le calcul PARK standard).

Option *Utiliser séries temporelles de l'objet Météo* : à partir de l'objet Météo, avec WAsP, on calcule pour chaque secteur de chaque éolienne, la distribution des vitesses du vent de laquelle on extrait la vitesse moyenne du vent. Puis on calcule, par secteur, le rapport entre la **vitesse moyenne des mesures** et la **vitesse moyenne à l'éolienne**. Avec ces rapports on multiplie les vitesses de l'objet Météo pour obtenir la série des vitesses du vent au niveau de chaque éolienne. Après applications des réductions de vitesse dues aux sillages, on établit les séries des puissances des éoliennes à partir desquelles on génère finalement les séries des distributions annuelles des productibles des éoliennes. Note : dans la présente version, la prise en compte des changements de la direction du vent qui se produisent en terrain très complexe n'est pas implémentée ; cela peut conduire à des résultats incorrects.



Pour les distributions statistiques du point 1), il faut disposer de données de vent couvrant exactement une année avec une fréquence suffisante.

Pour vérifier l'adéquation des données utilisées, après les avoir chargées dans un objet *Météo*, sélectionnez-les dans le menu *Utiliser séries temp. de l'objet Météo* et cliquez sur le bouton *Afficher* (voir Figure 84) pour ouvrir la fenêtre d'*Evaluation des données utilisées pour établir la distribution*, voir Figure 85. Si les données ne sont pas adéquates vous pouvez les retravailler avec le *Météo-analyser* (voir 3.3.3.3).

Figure 85

Pour la génération des séries temporelles du point 2), l'important est que les données de vent locales et les données de production aient une période commune. La comparaison avec les données de production peut se faire sur période couvrant quelques mois ou plusieurs années.

Si le travail porte sur des dizaines d'éoliennes, avec des données de 10mn couvrant plusieurs années, la quantité de données produite peut poser des problèmes de mémoire RAM. Par conséquent, comme indiqué antérieurement, par défaut, la commande *Résultats calcul* -> *fichiers* lance uniquement la génération de la série du productible du parc.

Pour réduire la quantité de données à traiter, on peut découper la période étudiée en plusieurs périodes plus courtes, répéter les calculs et réunir les résultats dans Excel.

Pour générer les séries, il faut cliquer sur le bouton *Résultats calculs* -> *fichiers*, de la fenêtre *Options de présentation* du rapport, qui ouvre la fenêtre *Génération des fichiers résultats* dans laquelle il faut choisir *Park time variation*. La Figure 86 montre les séries temporelles composant le fichier résultat d'un parc avec deux éoliennes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Mât de mesures - 40,00 m Data are air density corrected														
2	AEP scaled mean that the SUM total is equivalent to main calculation result for 1 year - the "raw" calculations can be found through the column "Power"														
3	Measure height: 40,0 m	450366	5110713			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
4	Time stamp	Wind speed	Direction	Temp	Pressure	AEP scaled	AEP scaled	Power	Power	Free wind speed	Free wind speed	Wake wind speed	Wake wind speed	Air density	Air density
5		[m/s]	[°]	°C	[hPa]	[MWh]	[MWh]	[kW]	[kW]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[kg/m³]	[kg/m³]
6	01/07/2001 01:00	9,2	87	9,4	#N/A	0,8228	0,7018	971,7	826	10,5	10,2	10,5	9,9	1,158	1,158
7	01/07/2001 02:00	8,1	90	8,1	#N/A	0,5714	0,489	674,8	575,6	9,3	9	9,3	8,8	1,163	1,163
8	01/07/2001 03:00	7,3	98	6,8	#N/A	0,4177	0,2884	493,3	339,4	8,3	8,1	8,3	7,4	1,168	1,168
9	01/07/2001 04:00	8,6	99	6,2	#N/A	0,6875	0,4848	811,9	570,6	9,8	9,5	9,8	8,7	1,171	1,17
10	01/07/2001 05:00	8,4	105	5,9	#N/A	0,6841	0,5744	807,9	676,1	9,8	9,6	9,8	9,2	1,171	1,171
11	01/07/2001 06:00	9	106	5,9	#N/A	0,8217	0,7445	970,4	876,3	10,5	10,2	10,5	10,1	1,171	1,171
12	01/07/2001 07:00	9,3	110	7,2	#N/A	0,8941	0,8373	1055,9	985,5	10,8	10,6	10,8	10,6	1,167	1,167
13	01/07/2001 08:00	10,1	121	8,7	#N/A	1,0577	1,0011	1249,1	1178,4	11,7	11,4	11,7	11,4	1,161	1,161
14	01/07/2001 09:00	8,8	128	9,5	#N/A	0,7457	0,6961	880,7	819,4	10,2	9,9	10,2	9,9	1,158	1,158
15	01/07/2001 10:00	8	136	9,7	#N/A	0,5253	0,5869	620,4	690,9	9,3	9,4	9	9,4	1,157	1,157

Figure 86

Informations sur les séries temporelles :

- *Time stamp, Wind speed, Direction, Temperature, Pressure* (Horodatage, Vitesse, Direction, Température, Pression) proviennent de l'objet *Météo* ou du fichier *.WTI* utilisé. Si les données de  $tp^0$  et/ou de pression sont présentes, alors le calcul de la densité de l'air est fait pour chaque tampon d'horodatage. La connaissance de la pression est moins importante que celle de la  $tp^0$  car la pression influence beaucoup moins la densité de l'air.
- *AEP scaled* : productibles ajustés pour que leur somme, si la période couvre une année, donne la même valeur que le calcul *PARK* standard (voir 3.4.0.0), cela permet, par exemple, de fournir au gestionnaire du réseau électrique un prévisionnel de la production.
- *Power* : c'est la puissance de l'éolienne calculé à partir de la vitesse du vent (colonne *Wind speed*) sans aucun ajustement. VERIFICATION des PERFORMANCES compare ces valeurs avec les puissances réelles enregistrées avec le SCADA.
- *Free wind speed* : vitesse du vent naturel (sans les effets des sillages) à l'emplacement de chaque éolienne calculé avec *WASP*.
- *Wake wind speed* : vitesse du vent précédente réduite par les effets des sillages des éoliennes.
- *Air density* : densité de l'air calculé individuellement pour chaque éolienne et pour chaque tampon d'horodatage.

La Figure 87 montre le résultat de la comparaison entre le productible calculé et la production réelle. L'étude porte sur un parc de 200 machines, la périodicité des données est de 10mn, les données ont été filtrées pour ne retenir que les périodes où au moins 140 machines étaient en production ce qui en cumulé donne seulement 9 jours. On constate une excellente correspondance entre le productible calculé et la production réelle.

Note : la valeur de la rugosité à l'intérieur du parc a dû être passée de la classe 0,8 à la classe 2,7 pour obtenir ce résultat ; c'est la solution la plus simple pour corriger le biais introduit par les modèles de sillage, présentement utilisés, pour l'étude des très grands parcs à disposition géométrique.

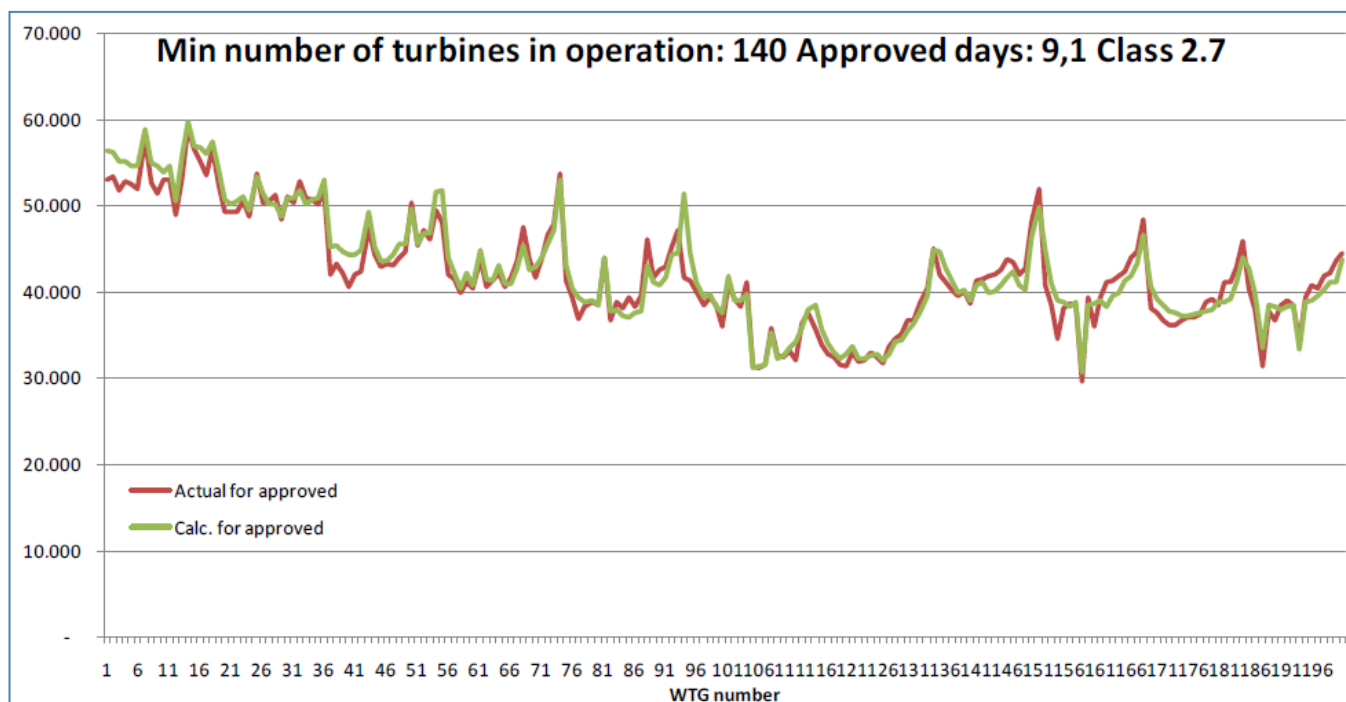


Figure 87

Ce type d'étude peut avantageusement être réalisée avec l'outil VERIFICATION des PERFORMANCES et économiser les jours de travail que demande la même étude avec Excel.

### 3.4.0.2 Calcul du RIX

Le RIX (Ruggedness Index) est le pourcentage de la surface autour d'un objet (typiquement une éolienne où un mât de mesure) dont la pente dépasse une valeur donnée.

A partir d'une pente de 30% se produit le décollement de la couche limite de l'écoulement du vent et le modèle WAsP n'est plus applicable. Des expériences ont mis en évidence une relation entre le RIX et l'erreur introduite par le modèle WAsP lorsqu'il est utilisé sur des terrains dont les pentes excèdent la limite d'application du modèle.

A partir de ce constat, l'Institut Risoe/DTU a développé une méthode permettant de corriger, ou tout au moins de réduire, l'erreur introduite par WAsP quand il est utilisé dans ces conditions. D'après certains papiers la correction RIX améliore aussi les résultats des calculs CFD.

Le graphique de la Figure 88 présente un exemple de l'erreur affectant la vitesse du vent calculé avec WAsP en fonction du Delta-RIX = RIX du site du calcul – RIX du site de référence. Le site de référence est le lieu origine des données de vent entrées dans WAsP et le site du calcul est le lieu de la prévision.

Dans le cas présenté, si le RIX du site des mesures de vent = 20% et si le RIX du site du calcul = 0% soit un Delta-RIX = –20%, alors, d'après le graphique, la vitesse du vent calculée devrait être sous-estimée de 30%, ce qui conduirait à un productible sous-estimé, à son tour, d'environ 60%\*. Par contre, si le RIX du site des mesures = 0% et si le RIX du site du calcul = 20%, soit un Delta-RIX = +20%, alors, d'après le graphique, la vitesse du vent calculée devrait surestimée de 30%, ce qui conduirait à un productible surestimé, à son tour, d'environ 60%\*. (\*) : voir note à la page suivante sur la correspondance entre l'erreur sur la vitesse du vent et l'erreur sur le productible.

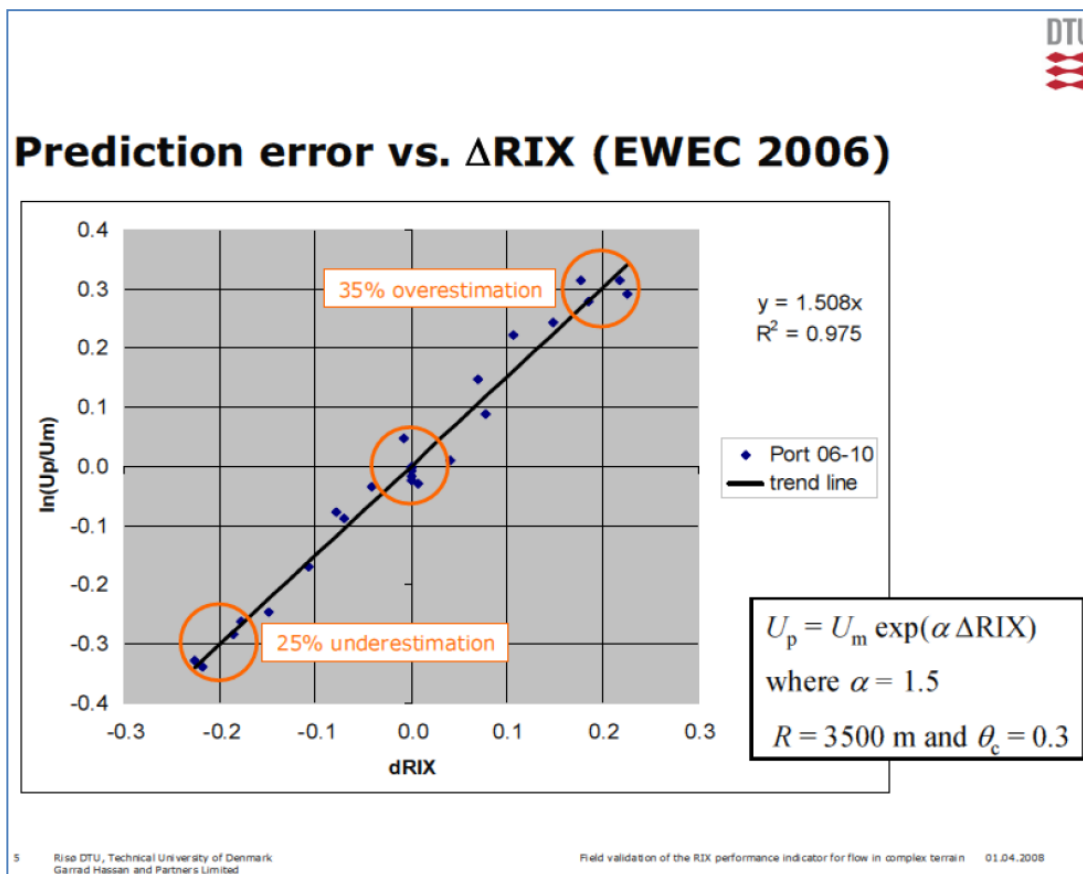


Figure 88

Les conclusions des plus récentes recherches de l'Institut Risoe en la matière indiquent que les meilleurs résultats sont obtenus en prenant en compte les pentes de plus de 40% pour le calcul du RIX (nouveau seuil par défaut dans WindPRO) et que si le  $|\Delta\text{RIX}| < 5\%$  alors les corrections ne sont pas nécessaires.

Quand plusieurs mâts de mesure sont disponibles, les outils *Contrôle croisé* et *Rix évaluation/correction*, du *Météo-analyser*, voir 3.3.3.2, permettent d'affiner la valeur du seuil.

Le module PERTES et INCERTITUDES permet de calculer automatiquement les corrections en utilisant les formules les plus récentes recommandées par Risoe. Vous pouvez les trouver dans les papiers présentés par Risoe à l'EWEC 2006 et 2008.



Pour des vitesses moyennes du vent de l'ordre de 6 à 7 m/s, l'erreur sur le productible est de l'ordre de 3 fois l'erreur sur la vitesse

Pour des vitesses moyennes du vent de l'ordre de 8 m/s, on peut dire que l'erreur sur le productible est de l'ordre de deux fois l'erreur sur la vitesse..

Pour des vitesses moyennes du vent de l'ordre de 9 m/s, l'erreur sur le productible est de l'ordre de 1,5 à l'erreur sur la vitesse.

Cela donne la représentation graphique de la Figure 89 (calculée à partir d'une éolienne typique).

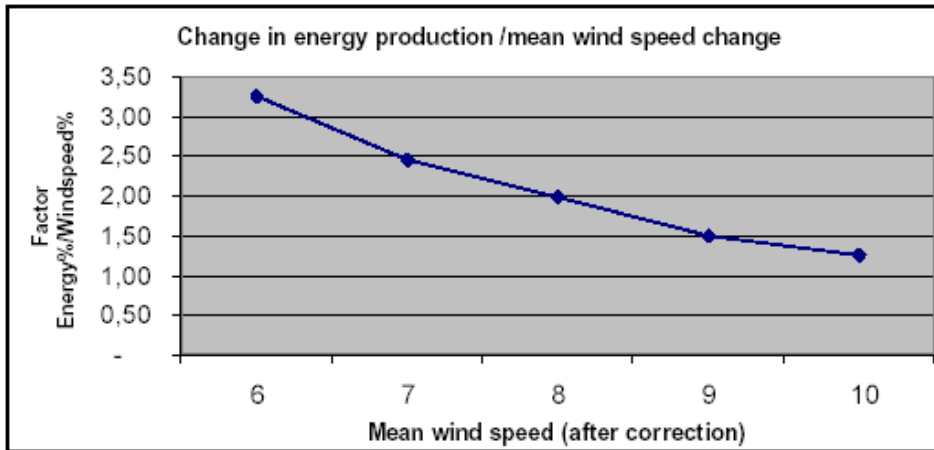


Figure 89

Source: EWEC06 paper:

#### IMPROVING WAsP PREDICTIONS IN (TOO) COMPLEX TERRAIN

Niels G. Mortensen<sup>1</sup>, Anthony J. Bowen<sup>2</sup> and Ioannis Antoniou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wind Energy Department, Risø National Laboratory

P.O. Box 49, VEA-118, 4000 Roskilde, Denmark

T (+45) 46 77 50 27, F (+45) 46 77 59 70

E-mail [niels.g.mortensen@risoe.dk](mailto:niels.g.mortensen@risoe.dk)

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department

University of Canterbury

Christchurch, New Zealand

Le paramétrage du calcul du RIX se fait dans l'onglet *Paramétrage du RIX*, présenté à la Figure 90.

Description des paramètres de calcul du RIX :

- *Calculer le RIX sur un rayon de* : l'étendue des surfaces, objet du calcul du RIX, autour des objets *Eoliennes* et *Données-site* est définie ici par leur rayon.
- *Résolution directionnelle* : cette valeur détermine la résolution et par conséquent la précision du calcul.
- *Seuil de pente minimum* : seules les surfaces dont la pente est supérieure au seuil indiqué dans ce champ sont prises en compte dans le calcul du RIX.
- *Pondération en fonction de la direction* : si l'option *aucune* est cochée, aucune pondération n'est appliquée ; si l'option *proportionnelle à la fréquence du vent* est cochée, une pondération est appliquée à chaque secteur en fonction de la fréquence du vent dans le secteur considéré.

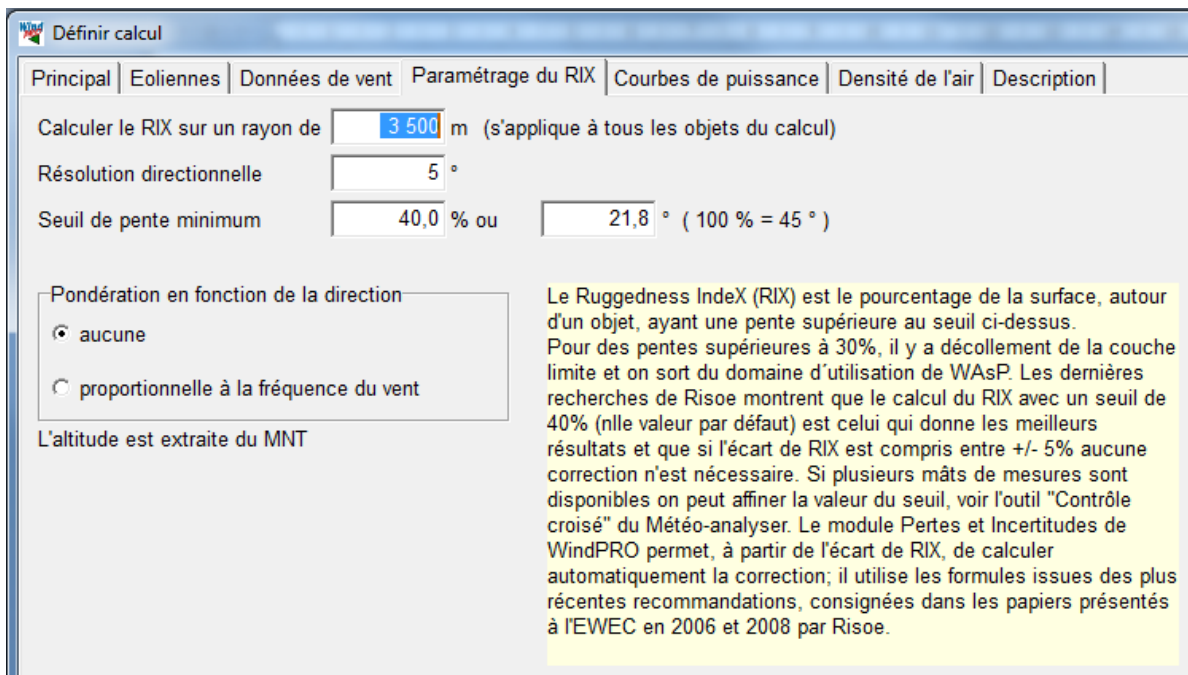


Figure 90

### 3.4.0.3 Calcul PARK avec les options « avancées »

Avant d'aborder les options « avancées », nous souhaitons vous signaler la page « Online Help », voir Figure 91, où vous trouverez typiquement des informations se rapportant à un usage « avancé » de WindPRO. Ces informations sont régulièrement mises à jour à partir des plus récents travaux de recherche. L'accès à la page « Online Help » se fait en cliquant sur *Base documentaire en ligne* du menu *Aide*.

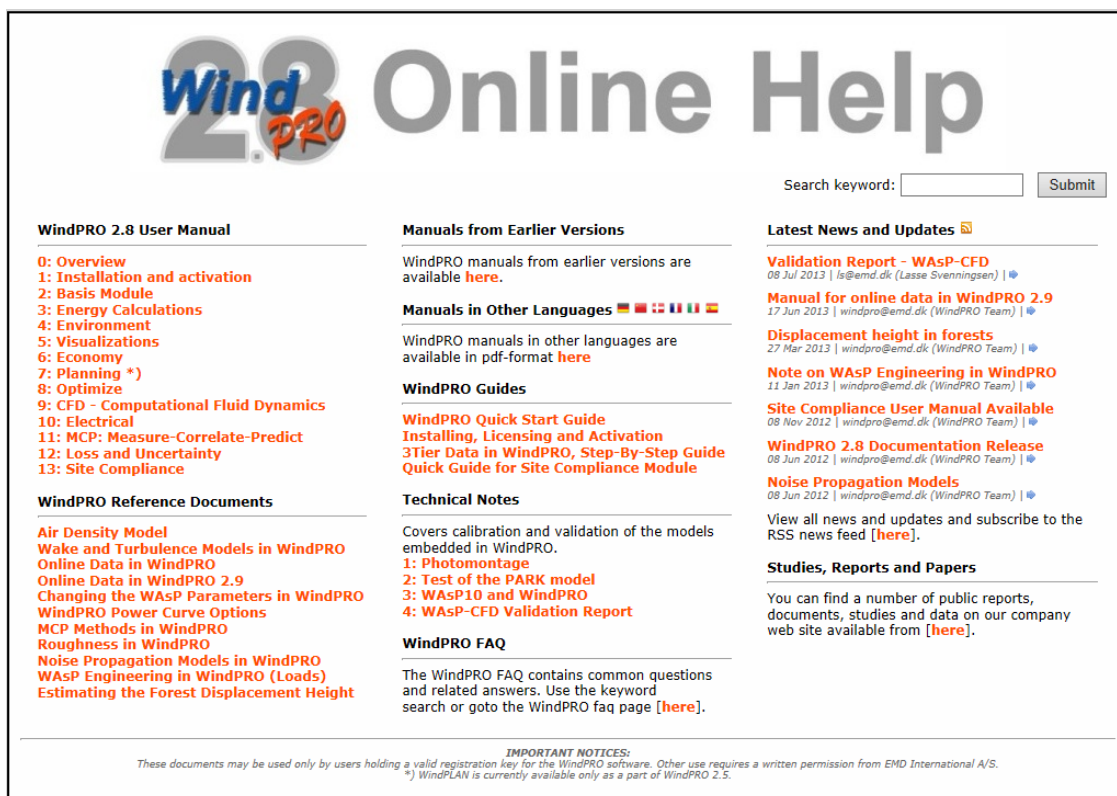


Figure 91

En cochant *Activer les options avancées*, dans l'onglet *Principal*, apparaissent des *Calculs avancés* et des *Options avancées* de paramétrage des *Modèles de sillage* et des *Modèles de turbulence*, voir Figure 92. Leur description est faite à la suite.

The screenshot shows the 'Principal' tab of the PARK software. The 'Calculer:' section has 'Nom' set to 'Copy of Copy of disposition fermiers' and 'Activer les options avancées' checked. Under 'Calculs typiques', 'Productible annuel' is checked. Under 'Calculs avancés', the text 'IL FAUT CHOISIR UN AUTRE MODELE DE SILLAGE' is displayed, with 'Réductions vit. vent dans le parc', 'Courbe de puiss. du parc, modèle PPV', and 'Intensité de la turbulence' all unchecked. The 'Paramètres Sillages / Turbulence' section shows 'Cte sillage (WDC) basée sur le type de terrain' set to 'Zone agricole d'aspect ouvert WDC: 0,075 RC:'. The 'Options relatives aux résultats présentés dans le rapport' section has 'Hauteur valeurs témoins' set to '50 m' and 'Calculer Weibulls à +/- 1/2 diamètre de rotor' unchecked. The 'Options avancées' section shows 'Modèle de sillage' set to 'N.O. Jensen (RISØ/EMD)' and 'Modèle de turbulence' set to 'Empirical turbulence - Dutch TNO laboratory : 1993'. Buttons for 'Modifier / Importer de Météo', 'Modifier les paramètres', and 'Modifier les paramètres' are visible.

Figure 92

### Calculs avancés

#### Calculs avancés

- Réduction des vit. du vent dans le parc
- Courbe de puiss. du parc, modèle PPV
- Intensité des turbulences

Pour accéder aux *Calculs avancés* il faut choisir un modèle de sillage autre que le *N.O. Jensen (RISØ/EMD)* proposé par défaut.

#### Réductions de la vitesse du vent dans le parc :

Ce calcul génère un tableau donnant la vitesse réduite du vent en fonction de la vitesse du vent non perturbé (sans les éoliennes) et de la direction à l'emplacement des éoliennes. Le tableau est obtenu sous forme d'un fichier texte en lançant *Résultats calculs -> fichiers*.

Ainsi, si le mât de mesure est laissé en place après la mise en service du parc et que les mesures sont alors perturbées par le sillage des éoliennes, on peut reconstituer les vitesses du vent non perturbé en créant, à l'emplacement du mât, une éolienne ayant un rotor minuscule (0,1m) et lançant un calcul des réductions de vitesses. A partir des vitesses du vent non perturbé on peut lancer un calcul de productible et afin de faire des comparaisons avec la production réelle, voir 3.4.0.1.

#### Courbe de puissance du parc, modèle PPV :

Ce calcul génère un tableau donnant la puissance du parc en fonction des (vit.,dir.) du vent en un point (non perturbé par le parc). Ce point correspond, en général, à un mât de mesure existant.

Ainsi, si des prévisions météo sont faites au niveau de ce mât elles peuvent être aisément transformées en prévisions de puissance du parc.

#### Intensité des turbulences :

Ce calcul permet d'estimer les intensités des turbulences (naturelles + sillages) auxquelles sont exposées les éoliennes.

**IMPORTANT** : l'intensité des turbulences est traitée exhaustivement dans module QUALIFICATION des SITES.

### Options avancées

Calculer Weibull pour +/- 1/2 diamètre de rotor (pour le fichier résultats)

Cette option permet de calculer les paramètres de Weibull à l'emplacement de chaque éolienne

pour les hauteurs égales à (moyeu + 1/2 rotor) et à (moyeu – 1/2 rotor) ; les résultats sont enregistrés dans un fichier texte en lançant l'opération *Résultats calculs -> fichiers*.

Cette option permet de rendre compte des différences de conditions de vent entre le bas et le haut des rotors de grand diamètre. Actuellement, les calculs de productibles annuels se font en considérant uniquement les vitesses du vent à hauteur de moyeu ; avec l'accroissement du diamètre des rotors cette méthode pourrait être remise en cause. En tout cas, WindPRO fournit, dès à présent, les informations permettant aux utilisateurs de faire leurs propres tests.

### Cte sillage (WDC)

Zone agricole d'aspect ouvert WDC: 0,075 RC: 1,5 T

Defini par l'utilisateur

Offshore & plans d'eaux WDC: 0,040 RC: 0,0 TI: 0,08

Mixte eau et terre WDC: 0,052 RC: 0,5 TI: 0,10

Zone agricole d'aspect très ouvert WDC: 0,063 RC: 1,0

Zone agricole d'aspect ouvert WDC: 0,075 RC: 1,5 TI: 0

Zone agricole WDC: 0,083 RC: 2,0 TI: 0,16

Zone agricole d'aspect fermé WDC: 0,092 RC: 2,5 TI: 0,

Zone agricole d'aspect très fermé WDC: 0,100 RC: 3,0 T

Dans le menu *Cte du sillage (WDC) basée sur le type de terrain* des options supplémentaires sont proposées, voir Figure 93.

Figure 93

En cliquant sur le bouton *Modifier / Importer de Météo* s'ouvre la fenêtre *Saisie des paramètres de sillage et/ou de turbulence*, voir Figure 94, permettant de décrire la *Cte du sillage* plus finement.

Les colonnes en gris indiquent les paramètres requis pour le modèle de sillage choisi. La turbulence naturelle est ajustée en fonction de la hauteur suivant la méthode décrite dans le manuel WindPRO.

Valeur de l'intensité de la turbulence naturelle qui sera utilisée pour toutes les vitesses de vent.

Turbulence mesurée à [m]

Nombre secteurs

De [deg]	à [deg]	Type et classe de terra	Intensité turbulence	Longueur de rugosité	Cte du sillage (WDC)
-180	180	Définie par l'utilisateur	0,1468	0,0550	0,0750

Intensité des turbulences

Longueur de rugosité

Cte du sillage (WDC)

Figure 94

La constante du sillage (*Wake decay constant*) peut être décrite par secteurs, librement définissables, en utilisant le menu *Type et classe de terrain*.

En cliquant sur bouton *Extraire de l'objet Météo*, s'ouvre la fenêtre *Données de turbulence de l'objet Météo* présentée à la Figure 95.

Étant donné que la constante du sillage dépend de la turbulence (qui elle-même dépend de la rugosité du terrain), on peut utiliser les données de turbulence contenues dans l'objet *Météo* du projet pour calculer la constante du sillage.

Figure 95

Le calcul des intensités des turbulences, auxquelles sont soumises les éoliennes, nécessite la connaissance des intensités des turbulences naturelles qui peuvent être extraites de l'objet Météo.

Les normes IEC utilisent la turbulence moyenne+1 écart-type si on se réfère à la norme IEC61400-1(ed.2) ou la turbulence moyenne+1,28 écart-type si on se réfère à la norme IEC61400-1(ed.3). Il est possible de choisir la turbulence représentative à utiliser en entrant le nombre d'écarts-types dans le champ *n*, voir Figure 95.

### Modèle de sillage

N.O. Jensen (EMD) : 2005
No model
N.O. Jensen (RISØ/EMD)
<b>N.O. Jensen (EMD) : 2005</b>
Eddy Viscosity Model (J.F. Ainslie) : 1986
EWTS II (G.C.Larsen) : 1999
EWTS II (G.C.Larsen) : 2008

Concernant les modèles de sillage, EMD recommande l'utilisation du modèle N.O. Jensen (RISØ/EMD). Si vous devez calculer les intensités des turbulences, c'est le modèle N.O. Jensen (EMD) 2005 qui est recommandé.

Les trois autres modèles sont plutôt destinés à un usage expérimental. Les essais effectués jusqu'à présent ne montrent pas un apport significatif quand ils sont utilisés avec les paramètres standards. Des recherches sont en cours pour affiner leur paramétrage.

### Modèle de turbulence

S. Frandsen: 1999 - Effective turbulence model
Pas de modèle (turb. naturelle seulement)
B.Lange: 2002 - Eddy viscosity turbulence
Recommandations Danoises : 1992
G.C.Larsen / EWTS II : 1999
<b>S. Frandsen: 1999 - Effective turbulence model</b>
Quarton/Ainslie: 1989 - Empirical turbulence model
Empirical turbulence - Dutch TNO laboratory : 1993
DIBt: 2004 - Added Turbulence Model

Concernant les modèles de turbulence, l'utilisation des modèles S. Frandsen 1999 ou TNO sont recommandés car, actuellement, ils réunissent les plus larges consensus.

Les modèles de sillage, de turbulence et les fonctions avancées de PARK sont décrits dans l'annexe « Wake and Turbulence Models ».



### 3.4.0.4 Modification du paramétrage de WAsP

En cliquant sur le bouton *Paramétrage de WAsP* s'ouvre la fenêtre de la Figure 96 qui permet de changer le paramétrage par défaut de WAsP. Cette possibilité se retrouve à différents endroits de WindPRO.

**Paramétrage de WAsP**

Vous pouvez, ici, modifier le paramétrage de WAsP. En cliquant sur OK il sera enregistré dans un fichier interne et utilisé dans tous les calculs SUIVANTS se rapportant à ce projet. Les "Recalculer" reprennent le paramétrage présent lors du calcul initial. Les paramètres non standard sont signalés en surbrillance jaune.

**IMPORTANT: il faut toujours travailler avec la même version et le même paramétrage que ceux utilisés pour créer la statistique éolienne utilisée pour les calculs!**

Paramètre	Minimum	Maximum	Standard	Valeur
<b>Site roughness assessment (Paramètres non standards: 0)</b>				
Max. number of roughness changes/sector	1	10	7	7
Sub-sectors in roughness map analysis	1	9	6	6
<b>WAsP wind modelling (Paramètres non standards: 1)</b>				
Avg. offset over land from neutral at z=P2	0,01	0,25	0,11	0,11
Azimuth resolution in BZ model [°]	1	15	5	5
Decay-length for roughness area size	1000	1000000	10000	10000
Depth of daily variation over land	50	100	100	100
Depth of daily variation over water	25	300	50	50
Factor in height of min. stab. induced var.	0	0,005	0,002	0,002
Height of inversion in BZ model	100	5000	1000	1000
Max. interpolation radius in BZ model	5000	50000	20000	20000
Offset heat flux over land	-200	200	-40	0
Offset heat flux over water	-200	200	15	15
Rel. amplitude of daily variation near ground	0,01	0,25	0,12	0,12
Rms heat flux over land	0	200	100	100
Rms heat flux over water	0	200	30	30
Softness of inversion in BZ model	0	1	1	1
True upwind direction in BZ model	-1	0	0	0
Width of coastal zone	5000	50000	10000	10000
<b>Wind atlas structure (Paramètres non standards: 2)</b>				
Number of standard heights	2	5	5	5
Number of standard roughness classes	2	5	4	4
Standard height #1 [m]	5	200	10	10
Standard height #2 [m]	5	200	25	25
Standard height #3 [m]	5	200	50	50
Standard height #4 [m]	5	200	100	120
Standard height #5 [m]	5	200	200	200
Standard roughness length #1 [m]	0	2	0	0
Standard roughness length #2 [m]	0	2	0,03	0,03
Standard roughness length #3 [m]	0	2	0,1	0,1
Standard roughness length #4 [m]	0	2	0,4	0,4
Standard roughness length #5 [m]	0	2	1	2

OK    Annuler    Rétablir les valeurs standards    Importer    Exporter

Paramètres WAsP actuels:    **Paramètres WAsP modifiés par l'utilisateur**

Version de WAsP: WAsP 6-9

Figure 96

Voici quelques exemples où il peut être pertinent de modifier certains paramètres :

- Remplacer dans *Std. Height #5* = 200 par 120 si vous savez que la hauteur de moyeu maximale est de 110m ainsi l'interpolation sera plus précise car elle se fera entre 100m et 120m au lieu de 100m et 200m.
- Remplacer *Std. Roughness #5* = 1 par 2 si le terrain présente de rugosités supérieures à 1m (classe 3.7) car une interpolation est plus précise qu'une extrapolation.
- Finalement, il peut être convenable de modifier les *heatflux* dans les régions très chaudes (déserts), ou d'appliquer les conditions de stabilité au-dessus de l'eau à terre.

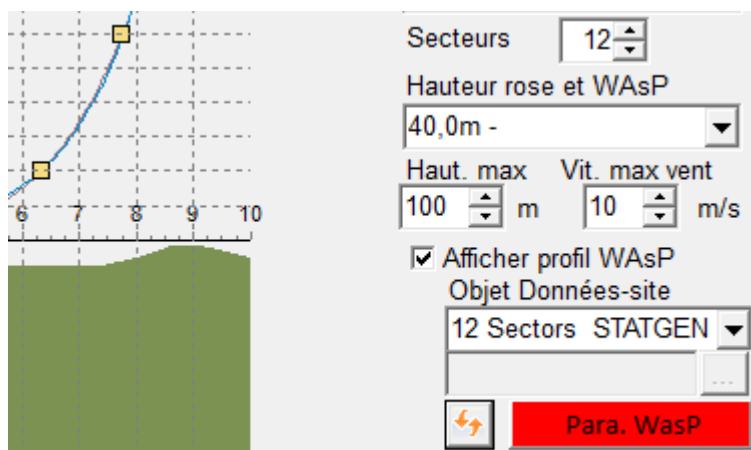
Paramétrage de WAsP

Présente version de WAsP: WAsP 6-9

Le bouton *Paramétrage de WAsP* en surbrillance jaune indique que les paramètres standards ne sont pas utilisés.

Le bouton apparaît en surbrillance également dans les autres endroits du logiciel où il est présent comme dans l'objet *Météo* le *Météo-analyser*, etc., afin de vous signaler que vous n'utilisez pas le paramétrage standard de WAsP.

Il va de soit qu'il faut utiliser le même paramétrage pour le calcul des *Statistique éoliennes* et le calcul de productible afin que WAsP utilise les mêmes paramètres dans le sens montant et dans le sens descendant (modèle du Wind Atlas, voir 3.1.1.0).



Le bouton *Paramétrage de WAsP* en surbrillance rouge averti que la version de WAsP utilisée est passée de <10 à >10 car les paramètres standards ont été modifiés lors de cette évolution de WAsP. Il faut donc reprendre le paramétrage pour réaliser les calculs dans les mêmes conditions.

### 3.4.1 Calcul avec METEO (productible d'une machine isolée)

Note préliminaire : dans l'onglet *Usage* des objets *Météo*, voir Figure 97, il convient de cocher les options B) ou F) si vous souhaitez effectuer des calculs de productibles à partir de leurs données. En procédant de cette manière, lors du lancement du calcul METEO seules les données ainsi sélectionnées seront proposées.

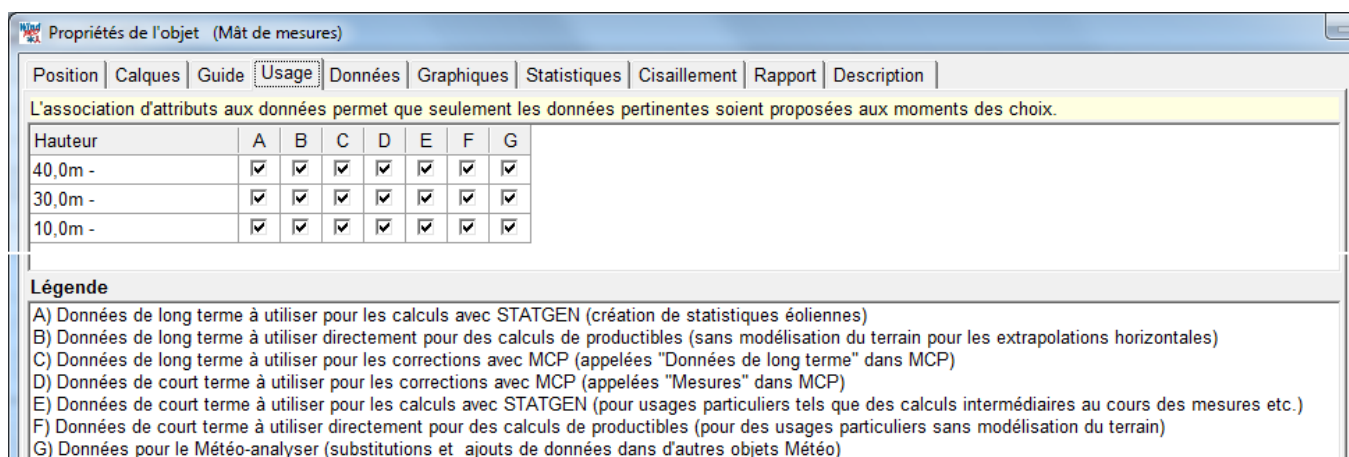


Figure 97

Au lancement du calcul METEO, la fenêtre de la Figure 98 s'ouvre.

### Onglet *Principal*

En cochant l'option *Calculer le profil vertical du vent*, le profil vertical du vent est présenté dans le rapport. Les autres options ont été décrites au 3.4.0.0

Figure 98

### Onglet *Données de vent et éoliennes*

Dans cet onglet se choisissent les données à partir desquelles se fera le calcul. Les données de vent se choisissent dans la partie *Sélectionner objets Météo* et les machines dans la partie *Eoliennes*, voir Figure 99.

Figure 99

Si on a importé les données d'un mât de mesure dans un objet *Météo*, elles sont disponibles sous leur forme brute en séries temporelles (*TIME SERIES*), sous forme de tableau/histogramme des fréquences (*MEASURE*) ou sous forme de distribution de Weibull (*WEIBULL*). Le calcul du productible peut se faire indifféremment à partir de ces trois formes, le choix se fait en sélectionnant la forme voulue dans la liste.

On peut ainsi comparer les productibles obtenues selon la forme des données utilisées.

Si on dispose seulement d'une vitesse moyenne du vent, on peut tout de même faire un calcul de productible. Il suffit d'entrer la vitesse moyenne en lui associant une valeur de  $k = 2$  dans l'onglet *Weibull* de l'objet *Météo*.

Vous pouvez sélectionner plusieurs éoliennes pour comparer leur productible à partir des mêmes conditions de vent. Le choix se fait dans la bibliothèque d'éoliennes en cliquant sur le bouton *Choisir dans la bibliothèque*. En cliquant sur bouton *Choisir dans la liste d'objets* tous les types de machines présents dans la liste d'objets du projet sont listés dans la fenêtre.

### Onglets *Courbes de puissance* et *Densité de l'air*

Voir calcul PARK. 3.4.0.

Si les hauteurs de moyeu des éoliennes sont différentes de la hauteur de mesure de vitesses du vent, WindPRO a besoin de connaître le gradient du vent pour faire les extrapolations.

Si dans l'onglet *Cisaillement* de l'objet *Météo* aucune valeur n'est disponible ou plusieurs jeux de valeurs sont présentes alors s'ouvre la fenêtre de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** dans laquelle vous devez entrer les valeurs (à cet effet le petit tableau donne la correspondance entre la rugosité et l'exposant de la loi puissance) ou choisir un jeu de valeurs.

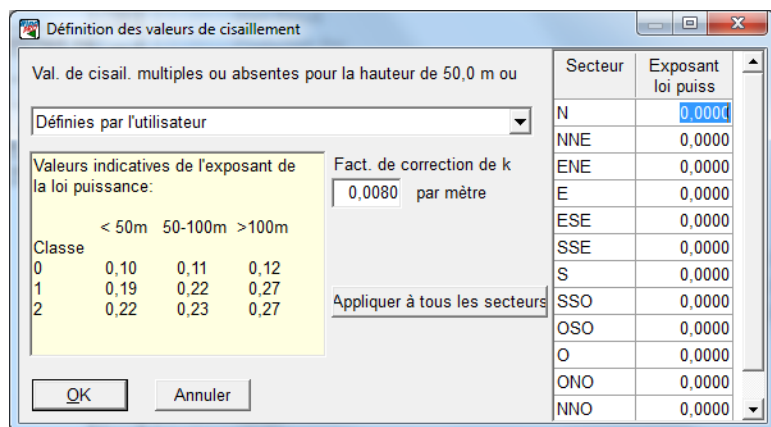


Figure 100

Cisaillement moyen pour le site de Belringe				
Hauteur	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3
10-25 m	0,10	0,19	0,22	0,30
25-50 m	0,10	0,20	0,22	0,26
50-100 m	0,11	0,23	0,24	0,26
100-200 m	0,12	0,28	0,27	0,27

Depuis l'introduction de version 2.9, les valeurs de cisaillement proposées, voir Figure 100, ont été modifiées car le cisaillement n'est pas le même à toutes les hauteurs. Ces valeurs résultent du cisaillement produit par le terrain corrigées par un modèle de stabilité atmosphérique (comme avec WAsP).

Le tableau ci-contre montre les valeurs relevées sur le site de Belringe.

La correction du paramètre  $k$  de la distribution de Weibull est compliquée car elle dépend des hauteurs entre lesquelles se fait l'extrapolation.

Les graphiques de la Figure 100 montrent comment WAsP appréhende l'évolution de  $k$  en fonction de la hauteur pour les 4 classes de rugosité (0 à 3). Le graphique de gauche a été produit à partir de la statistique éolienne de référence du Danemark, Beldringe, et celui de droite à partir de la statistique éolienne issue d'un site offshore au Danemark.

Les deux graphiques sont similaires mais les valeurs de  $k$  du site offshore sont plus élevées ce qui s'explique en partie par les vitesses moyennes du vent plus élevées. On constate qu'à terre, entre 50 et 100m, l'accroissement est de 0,2 soit 0,004 par mètre ; au-delà de 100m à terre ou dès 50m offshore  $k$  décroît avec la hauteur et une correction de -0,001 par mètre semble appropriée.

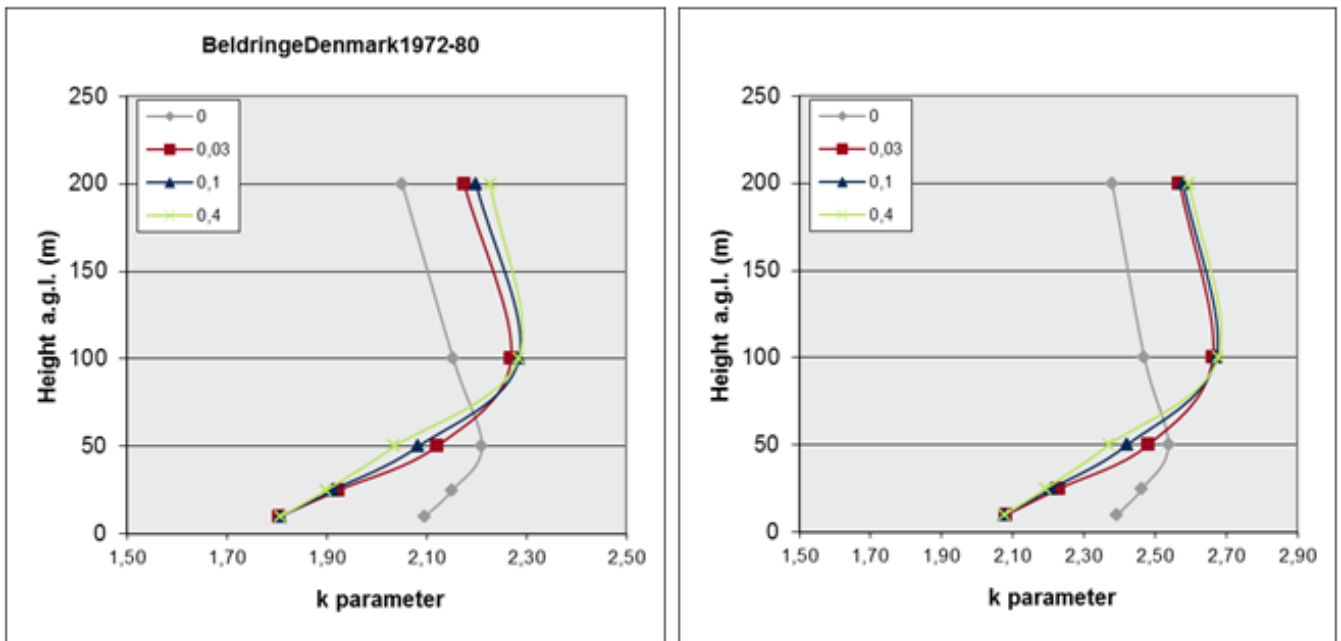
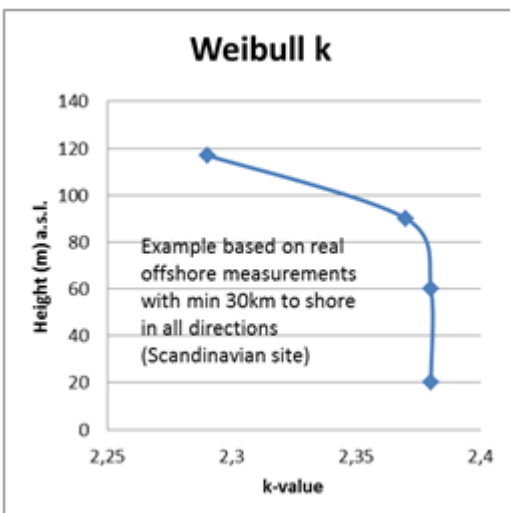


Figure 101



Le graphique ci-contre montre l'évolution de k relevé sur un mât offshore située à 30 km des côtes scandinaves les plus proches.

Après le calcul les résultats peuvent être exportés sous forme de fichier texte exploitable par un tableur, voir Figure 102, en cliquant sur le bouton *Résultats calculs* -> *fichiers* de la fenêtre *Options de présentation* du rapport.

Données valides	Fabricant	Modèle	Puiss. nominale	Diamètre du rotor	Hauteur de moyeu	Total	Fact. correction stat. éol	Rugosité équivalente	Vmoy du vent	Valeur HP	densité air	Translation de hauteur
			[kW]	[m]	[m] (Watch)	[MWh]			[m/s]	[%]	[kg/m³]	[m]
Oui	NORDEX	S77-1 500	1 500	77	100	7 949,3	1		9,78	102	1,158	0
Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66	67	6 361,5	1		9,06	100	1,162	0
Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66	80	6 787,3	1		9,37	99	1,161	0

Figure 102



## 3.4.2 Calculs avec MODELES

A la différence du calcul METEO qui utilise directement les mesures de vent, les calculs avec MODELES font appel à une modélisation.

L'acquisition du module MODELE donne accès à quatre calculs. Ils sont décrits succinctement dans les lignes suivantes étant donné leur similitude avec le *Calcul de productible annuel* avec PARK vu au 3.4.0.0.

Concernant les deux premiers décrits, WASP-Interface et ATLAS, soit l'un, soit l'autre, ou indifféremment l'un ou l'autre pourra être lancé selon le paramétrage de l'Usage de l'objet *Données-site*.

### 3.4.2.0 Calcul WASP-Interface

WASP-Interface calcule le productible d'une éolienne isolée positionné à l'emplacement de l'objet *Données-site*. Comme le calcul METEO il permet de comparer le productible de différentes machines soumises aux mêmes conditions de vent.

WASP-Interface fait appel à WASP pour calculer les caractéristiques du vent (à partir de la description du terrain et d'une ou plusieurs *Statistiques éoliennes*) et les transmet à WindPRO qui calcule les productibles à partir des courbes de puissance corrigées en fonction de la densité de l'air.

WASP-Interface permet également de calculer le profil vertical du vent basé simplement sur des hypothèses de cisaillement.

La Figure 103 montre la fenêtre de paramétrage du calcul. L'onglet *Principal* est identique à celui du calcul METEO, voir 3.4.1, les autres onglets ont été décrits dans la partie consacrée au *Calcul du productible annuel* avec PARK, voir 3.4.0.0.

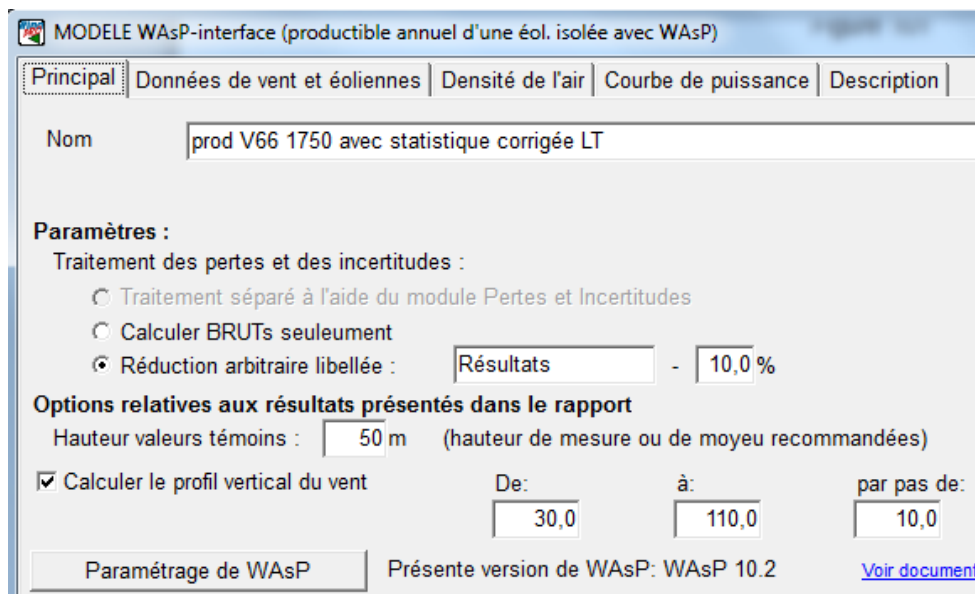


Figure 103

### 3.4.2.1 Calcul ATLAS

La mise en œuvre du calcul est identique à celle de WASP-Interface. ATLAS n'utilise pas WASP (donc une licence WASP n'est pas requise) mais un modèle d'écoulement beaucoup plus simple. Par conséquent, l'usage d'ATLAS n'est pas recommandé pour les grands projets.

### 3.4.2.2 Calcul RESSOURCE

Voir le chapitre 3.6 est consacré à ce calcul.

### 3.4.2.3 Calcul WAsP-CFD

Voir la section qui est consacré à ce calcul.

### 3.4.3 Calcul STATGEN (statistique éolienne méthode du Wind Atlas)

Les mesures utilisées pour le calcul d'une statistique éolienne devraient toujours être représentatives du long terme. Si ce n'est pas le cas, le module MCP permet de les corriger.

La génération d'une statistique éolienne régionale requiert :

- Des mesures de vent (collectées dans un objet *Météo*, « marquées » pour STATGEN dans l'onglet *Usage*),
- La description du terrain à l'emplacement des mesures (en utilisant un objet *Données-site* ayant pour usage *STATGEN*),
- Le programme WAsP de RISØ/DTU.

La description du terrain, autour du mât de mesure, doit être faite très soigneusement. Si dans l'objet *Données-site*, la *Source des données de rugosité* choisie est un objet *Données-lignes* alors la rose des rugosités sera automatiquement centrée sur la position de l'objet *Météo* (mât de mesures).

Quand les objets nécessaires au calcul sont en place, on lance le calcul STATGEN qui ouvre la fenêtre *Définir calcul* de la Figure 104.

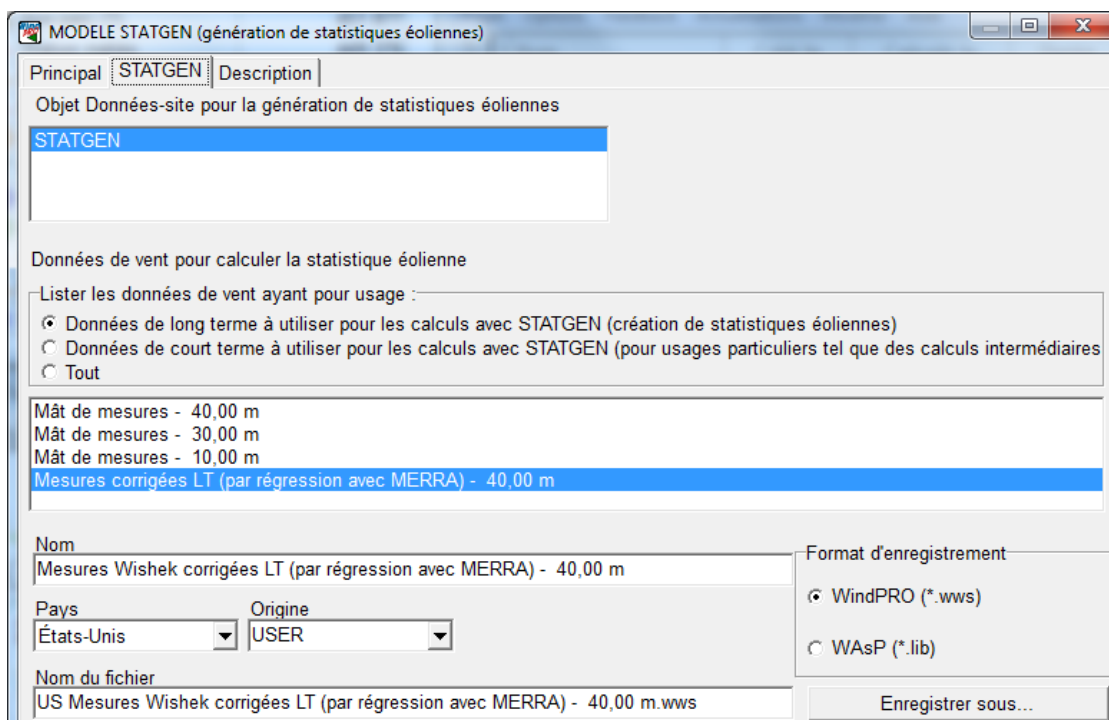


Figure 104

Si plusieurs objets *Données-site* et jeux de *Données de vent* sont présents, leur choix pour le calcul de la *statistique éolienne* se fait dans l'onglet *STATGEN*.

Remarque : la statistique générée par STATGEN peut être enregistrée soit au format texte WAsP *.lib* soit au format binaire WindPRO *.wvs*. Dans les deux cas les coordonnées du mât de mesures sont enregistrées dans les fichiers afin de pouvoir positionner la statistique sur les cartes. Dans les fichiers *.lib* les coordonnées sont enregistrées dans l'en-tête du fichier.

Le format WindPRO offre, en plus, la possibilité d'insérer un commentaire et un facteur de correction du productible. Il enregistre aussi les informations relatives aux mesures utilisées à la version de WAsP et à son paramétrage ; ces informations sont présentées dans le rapport, voir Figure 105.

### STATGEN - Infos statistiques éoliennes

Calcul: à partir des mesures corrigées LT **Données de vent:** A - Mesures corrigées LT (par régression avec MERRA); Hauteur : 40,0

#### Principales infos relatives à la statistique éolienne

<b>Fichier</b>	US Mesures Wishek corrigées LT (par régression avec MERRA) - 40,00 m.wvs
<b>Nom</b>	Mesures Wishek corrigées LT (par régression avec MERRA) - 40,00 m
<b>Pays</b>	États-Unis
<b>Origine</b>	USER
<b>Coord. mât mesures</b>	UTM (north)-WGS84 Fuseau: 14 Est: 450 366 Nord: 5 110 712
<b>Créé(e) le</b>	29/11/2012
<b>Modifié(e) le :</b>	26/07/2013
<b>Secteurs</b>	12
<b>Version de WAsP</b>	WAsP 6-9 RVEA0011.dll 1, 0, 0, 13

#### Informations supplémentaires

<b>Données d'entrée</b>	Mesures corrigées LT (par régression avec MERRA)
<b>De</b>	31/12/1991
<b>à</b>	31/12/2002
<b>Durée des mesures</b>	132,0 mois
<b>Taux d'acquisition</b>	99,9 %
<b>Durée effective des mesures</b>	131,9 mois

#### Commentaire

Pour obtenir les meilleurs résultats, les calculs des statistiques éoliennes et les calculs utilisant ces mêmes statistiques doivent être fait avec le même modèle et le même paramétrage du modèle. Les versions WAsP 10.0 et antérieures utilisent le même modèle, les suivantes utilisent des évolutions affectant les statistiques éoliennes. De la même manière, les calculs WAsP CFD devraient toujours utiliser des statistiques calculées avec WAsP CFD.

Figure 105

La Figure 106 montre les caractéristiques de la *statistique éolienne* calculée telles que présentées dans le rapport.

#### Vmoy du vent [m/s]

Hauteur [m]	Classe de rugosité/Longueur			
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	8,5	5,9	5,2	4,1
25,0	9,2	7,0	6,3	5,3
50,0	9,9	8,1	7,4	6,4
100,0	10,7	9,4	8,7	7,6
200,0	11,7	11,5	10,5	9,2

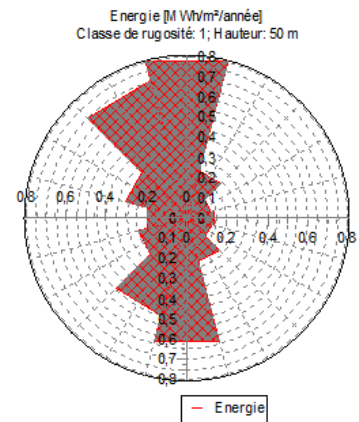
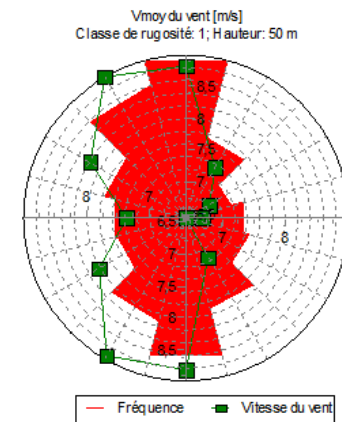
#### Energie vent [kWh/m<sup>2</sup>/année]

Hauteur [m]	Classe de rugosité/Longueur			
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	4 934	1 894	1 249	604
25,0	6 338	3 032	2 209	1 309
50,0	7 663	4 277	3 284	2 153
100,0	9 757	6 524	5 036	3 427
200,0	13 156	11 853	9 037	6 029

#### Productible [kWh/m<sup>2</sup>/année]

Eol. pour vent normal (0,45 kW/m<sup>2</sup>)

Hauteur [m]	Classe de rugosité/Longueur			
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	1 519	739	509	203
25,0	1 731	1 095	867	555
50,0	1 896	1 411	1 194	881
100,0	2 021	1 781	1 578	1 274
200,0	2 129	2 107	1 992	1 716



Eol. pour vent fort (0,55 kW/m<sup>2</sup>)

Hauteur [m]	Classe de rugosité/Longueur			
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	1 702	767	522	196
25,0	1 953	1 178	914	572
50,0	2 151	1 575	1 304	930
100,0	2 300	2 013	1 772	1 403
200,0	2 429	2 404	2 266	1 935

Eol. pour vent faible (0,35 kW/m<sup>2</sup>)

Hauteur [m]	Classe de rugosité/Longueur			
	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0	1 328	692	493	228
25,0	1 481	1 002	804	533
50,0	1 646	1 263	1 086	816
100,0	1 771	1 531	1 364	1 152
200,0	1 879	1 857	1 742	1 466

#### Valeurs essentielles

Energie du vent relative (Réf: 3300 kWh/m<sup>2</sup>/an pour une rugosité de classe 1 et une hauteur de moyeu de 50 m)

Productible relatif (Réf: 1025 kWh/m<sup>2</sup>/an pour une rugosité de classe 1 et une hauteur de moyeu de 50 m)

Nom	Distance [km]	Energie vent [%]	Productible [%]	Nom	Distance [km]	Energie vent [%]	Productible [%]
Statistique éolienne calculée		129,6	137,7	Crookston WRAP site at 50m	288,5	75,0	87,5
Ryan Hill	208,4	88,4	98,1	Syre OTP site at 40 meters	289,1	102,1	116,2
Brekenridge Tall Tower site at 50m	240,1	85,7	95,1				
Sabin WRAP site at 50 m	242,9	78,9	85,9				

Figure 106

Remarque: le paragraphe *Valeurs essentielles* présente sous forme de pourcentages l'*Energie du vent* et le *Productible* se rapportant à la *Statistique éolienne calculée* et ceux se rapportant aux statistiques voisines. Ces pourcentages résultent de la comparaison avec l'*Energie du vent* et du *Productible* établis à partir d'une statistique éolienne de référence. Cela permet, par comparaison avec les statistiques voisines, d'évaluer la pertinence de la *Statistique éolienne calculée*.

La *Statistique éolienne calculée* est enregistrée à l'emplacement indiqué dans l'onglet *STATGEN* de la Figure 104. L'utilisation d'une *statistique éolienne* pour le calcul d'un productible se fait via un objet *Données-site*, ayant pour usage *Calculs de productibles...*

### 3.4.4 Conversion de la correction de productible en correction de la vitesse du vent

Si on a constaté, par comparaison avec les productions réelles, que les productibles des éoliennes calculés avec une statistique éolienne sont biaisés, on peut, si cette statistique a été générée avec WindPRO, lui associer un facteur de correction qui sera appliqué à tous productibles calculés avec cette statistique.

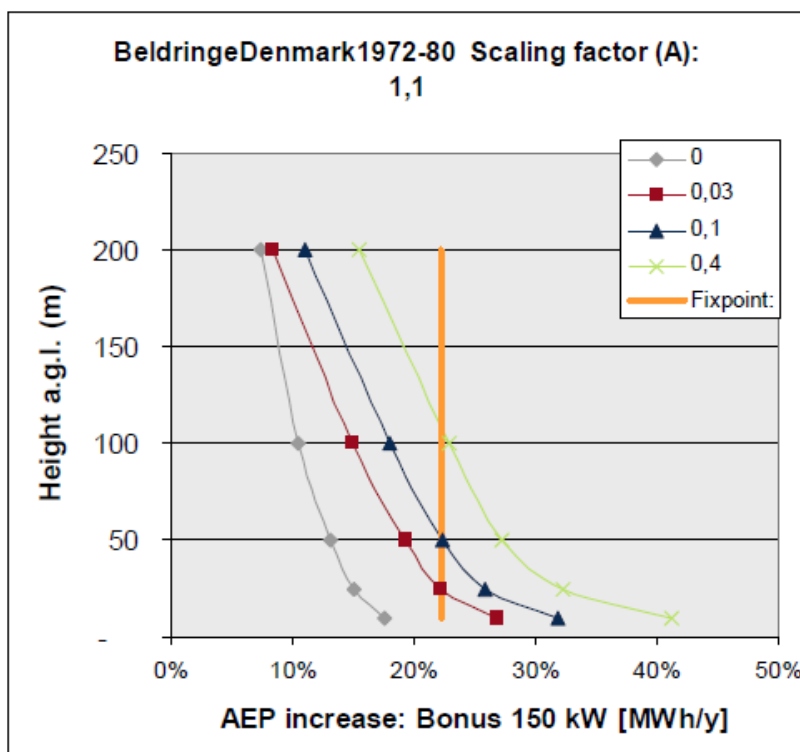
Cette correction donne des résultats satisfaisants quand elle est appliquée à des vitesses de vent similaires à celles ayant conduit à l'introduction ce facteur de correction. Par contre, si cette correction a été établie, par exemple, à partir de petites éoliennes et qu'elle est appliquée à des éoliennes de taille beaucoup plus grande (qui voient des vitesses moyennes de vent beaucoup plus élevées) les productibles seront mal corrigés car le facteur est en fait dépendant de la vitesse moyenne du vent.

Afin de résoudre ce problème, nous avons développé une nouvelle méthode qui converti le facteur de correction sur le productible en facteur de correction sur la vitesse du vent. De cette manière, les vitesses moyennes du vent calculées à partir de la statistique seront plus précises et les paramètres A de Weibull correspondants, apparaissant dans *Résultats calculs* -> *fichier* d'un calcul PARK par exemple, seront corrects.

En effet, avec l'ancienne méthode, l'utilisation d'un statistique éolienne avec un facteur de correction se traduisait par une simple modification des vitesses moyennes présentés dans les rapports, mais les paramètres A n'étaient pas corrigés.

Depuis la version 2.7 de WindPRO l'ancienne méthode n'est plus proposée.

La Figure 107 illustre la différence entre les deux méthodes.



Pour rendre compte de la production réelle d'une Bonus de 150 kW à 25m de hauteur sur un terrain de rugosité = 0,03m (CI 1), une correction de +22% à dû être appliqué au productible calculé avec la statistique éolienne.

Avec l'ancienne méthode on appliquait un facteur de correction = 1,22 à tous les productibles calculés avec la statistique.

Avec la nouvelle méthode, à partir du facteur de correction de 1,22 de départ, la correction introduite lorsque la Bonus 150 kW est montée à 100m de hauteur passe, dans les mêmes conditions de rugosité, à environ +15% (courbe rouge) au lieu des +22% uniformément appliqués avec l'ancienne méthode.

Figure 107

Depuis la version 2.6, les *statistiques éoliennes* avec un facteur de correction sur le productible peuvent avoir les trois origines décrites à la suite et leur conversion en statistiques avec correction de la vitesse du vent peut être plus ou moins aisée.

#### 3.4.4.0 Statistique créée à partir d'un calcul MCP (méthode indicielle)

Le calcul MCP avec la méthode indicielle produit un facteur de correction du productible valable pour la courbe de puissance et la vitesse moyenne du vent utilisés pour le calcul.

C'est la situation la plus simple à traiter étant donné que le logiciel dispose de toutes les informations nécessaires : facteur de correction du productible, courbe de puissance et vitesse moyenne du vent ayant déterminé le facteur. Ces informations sont utilisées pour convertir la statistique avec facteur de correction sur le productible en statistique avec facteur de correction sur la vitesse du vent.

A partir des mêmes mesures de vent, les productibles différeront légèrement de ceux obtenus avec WindPRO2.5. Pour obtenir exactement les mêmes résultats procédez de la manière suivante : lancez une correction des mesures avec la méthode MCP indicielle et relevez dans les résultats le facteur de correction obtenu ; générez la statistique éolienne à partir de mesures ; ouvrez l'objet *Données-site* utilisé pour les calculs de productibles, dans l'onglet *Statistiques éoliennes* ouvrez la fenêtre *Modification d'une statistique éolienne* avec le bouton *Modifier une statistique*, voir Figure 108, et entrez le *Facteur de correction du productible* que vous avez relevé.

A terme cette possibilité devrait disparaître.

#### 3.4.4.1 Ancienne statistique avec facteur de correction

Dans le cas d'une ancienne statistique, on peut utiliser l'outil de conversion accessible depuis l'objet *Données-site*, voir Figure 108.

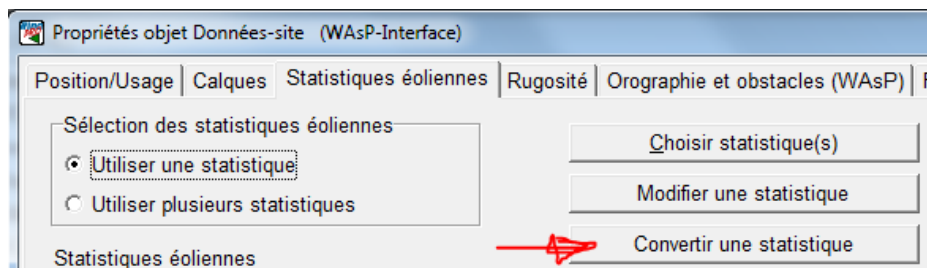


Figure 108

Dans l'utilitaire *Conversion d'une statistique éolienne* montré à la Figure 109 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, doivent être entrées les conditions de départ ayant conduit à associer à la statistique un facteur de correction du productible. Le calcul de la correction est lancé cliquant sur le bouton *Calculer*.

Le bouton *Comparaison -> p-papiers* colle dans le presse-papier les caractéristiques des statistiques originelle et modifiée afin de pouvoir comparer les différences avec Excel.



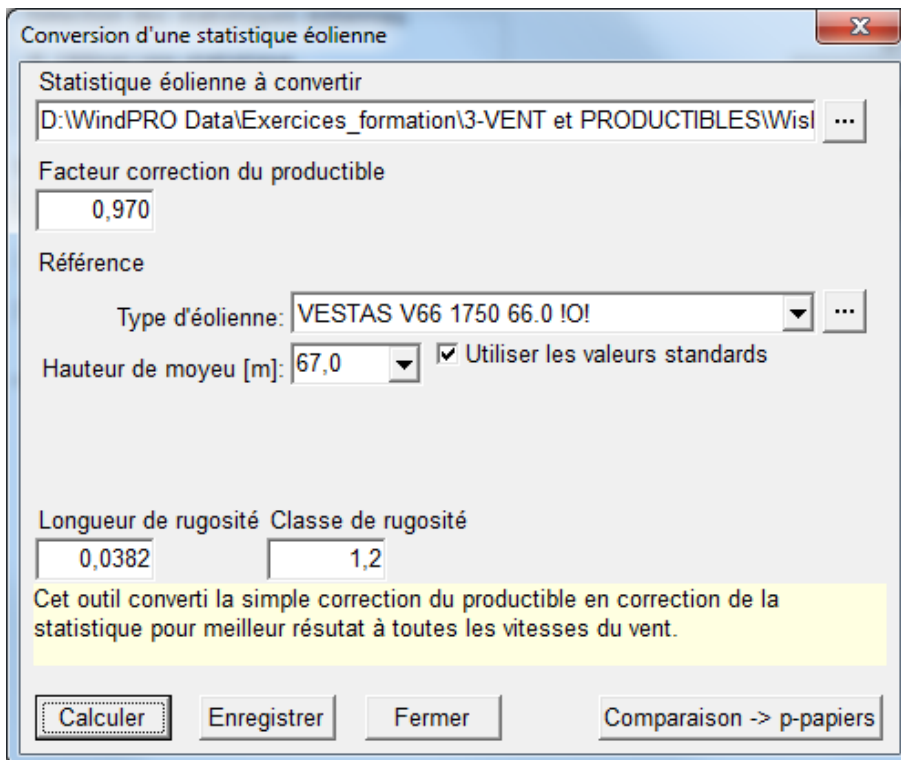


Figure 109

### 3.4.4.2 Correction régionales DK'92 –DK07 des statistiques éoliennes du Danemark

Au Danemark, WindPRO appliquait automatiquement le facteur de correction correspondant au lieu du projet à la statistique éolienne « DK'92 ».

Cette pratique avait trois inconvénients:

- 1) La valeur standard de la densité de l'air était utilisée, là où WindPRO aurait calculé la densité spécifique de l'air, ce qui donne des résultats 2-3% trop élevés.
- 2) La correction à long terme (7-8% en 2006) n'était pas faite.
- 3) La correction appliquée sur le productible et non sur la vitesse du vent.

Par conséquent des productibles surestimés de l'ordre de 10% étaient obtenus. Cette surestimation était encore plus forte avec les nouvelles éoliennes de grande taille et dans les sites très ventés.

Ces trois défauts ont été corrigés avec la « DK07 » dont l'utilisation est recommandée pour les projets au Danemark.

## 3.4.5 Affichage et lecture des rapports

### 3.4.5.0 Affichage des rapports

Chaque calcul génère un rapport qui vient s'ajouter à la liste des rapports dans fenêtre *Calculs et rapport* présentée à la Figure 110.

Des colonnes d'information indiquent la date de création du rapport, la date et la durée du calcul, la version de WindPRO avec laquelle le calcul a été fait et la taille du fichier du projet.

Un clic sur les boutons « + » ou « - » devant le nom d'un rapport affiche ou masque les différentes sections du rapport.

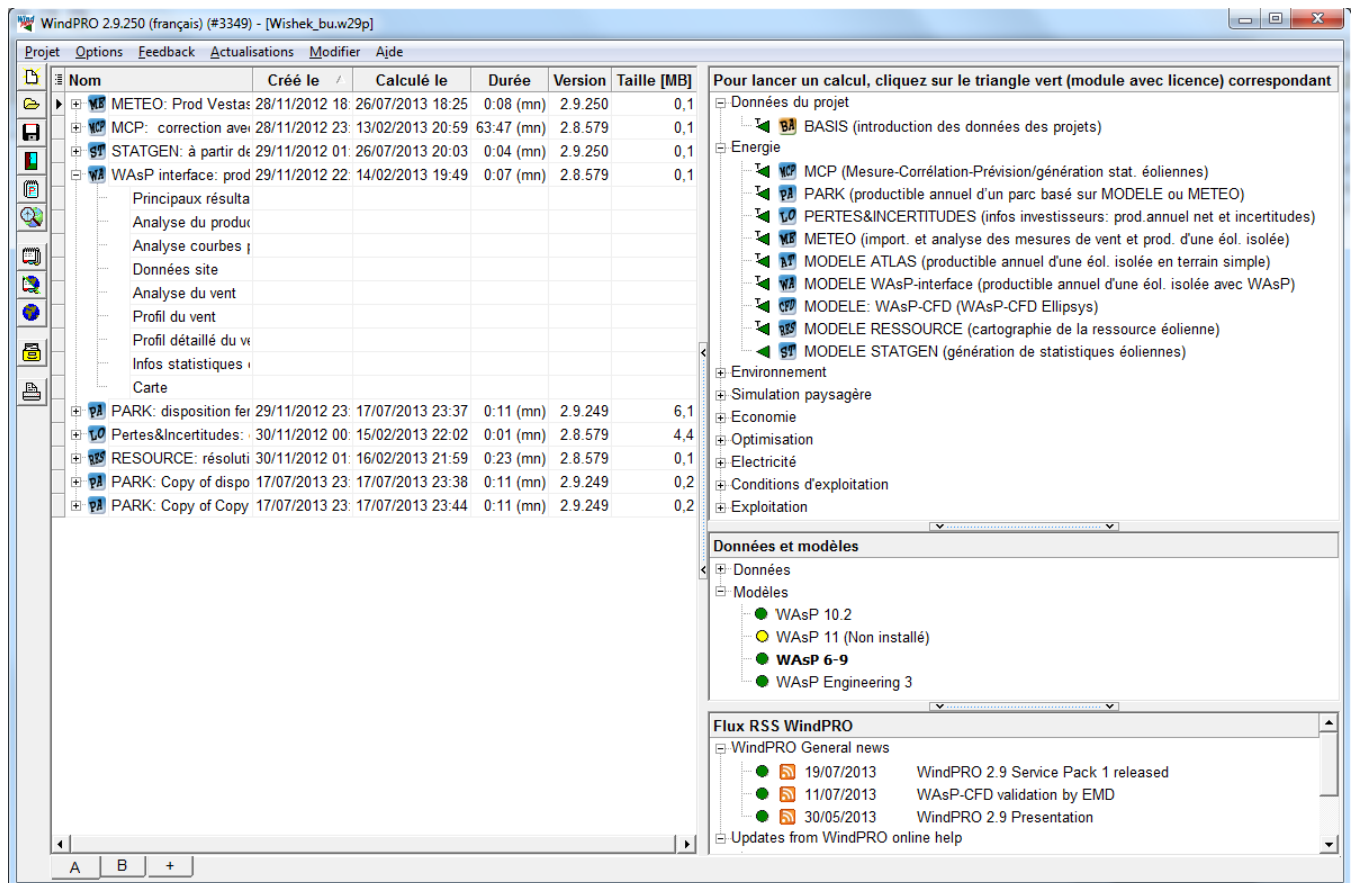
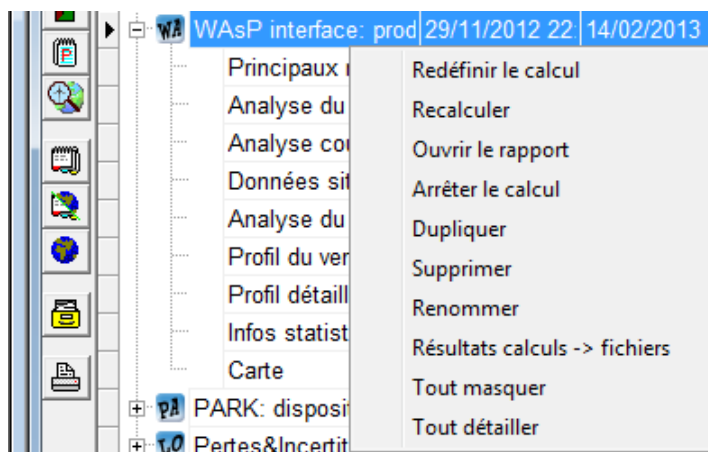


Figure 110



Un clic avec le bouton droit de la souris sur le titre d'un rapport ouvre le menu contextuel de la Figure 111:

Figure 111

*Redéfinir le calcul* : ouvre la fenêtre de paramétrage du calcul pour le modifier (ou simplement voir)

**Recalculer** : permet de relancer le calcul pour prendre en compte des changements (déplacement des éoliennes par ex.) sans changer le paramétrage du calcul.

**Ouvrir le rapport** : ouvre la fenêtre de la Figure 112 où sont proposées différentes *Options de présentation*. Dans les onglets de la partie droite de la fenêtre on sélectionne les options de présentation à appliquer à la section du rapport sélectionnée dans le cadre *Sommaire*. Les boutons *Afficher* et *Imprimer* permettent respectivement d'afficher le rapport à l'écran et de lancer son impression.

Pour plus d'informations sur les *Options de présentation* reportez-vous à la section 2, BASIS.

**Arrêter le calcul** : arrête le calcul en cours.

**Dupliquer** : si l'on fait des changements et que l'on fait *Recalculer*, le rapport initial est écrasé par les résultats du nouveau calcul. En lançant *Recalculer* à partir d'un rapport dupliqué, le rapport initial est conservé et nouveau rapport reprend toutes les options de présentation du rapport initial.

**Renommer** : donne accès à l'onglet *Principal* de la fenêtre de paramétrage du calcul afin de pouvoir modifier le nom rapport, les commentaires, etc.

**Résultats calculs -> fichiers** : cette option permet d'extraire certaines informations et certains résultats et de les enregistrer dans des fichiers ou dans le presse-papiers afin de les utiliser avec une autre application (typiquement un tableur).

**Tout Masquer** et **Tout afficher** : comme les boutons «-» / «+» mais l'action s'applique à tous les rapports.

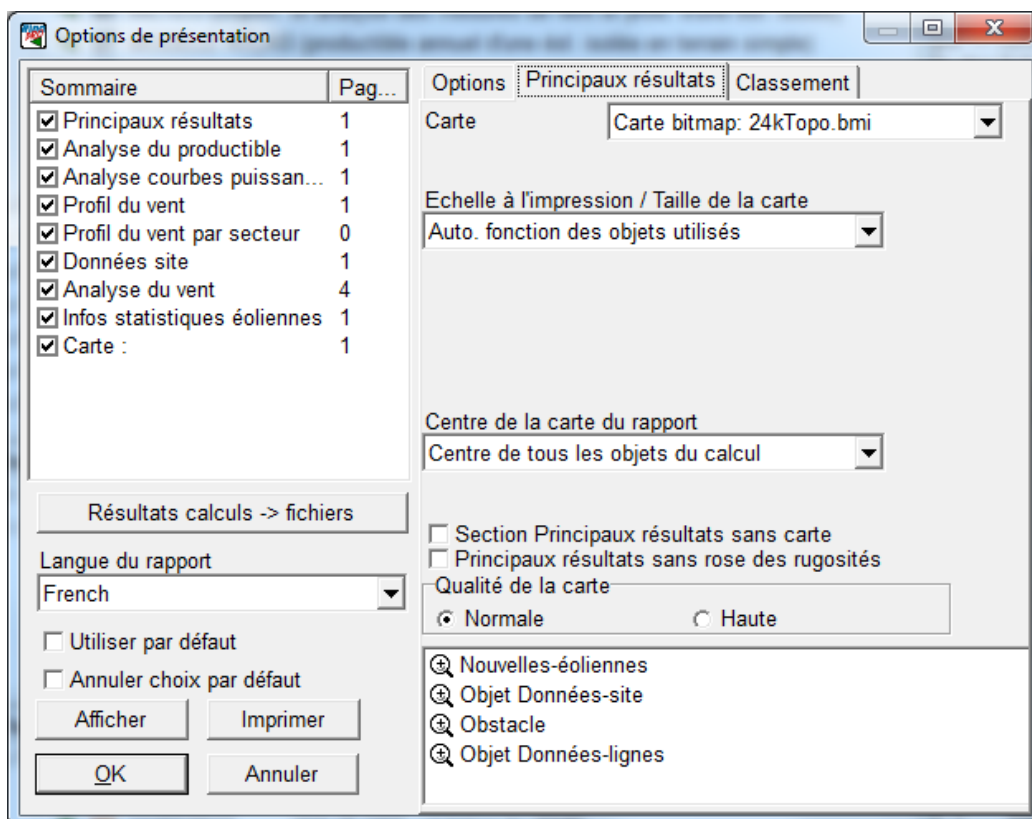
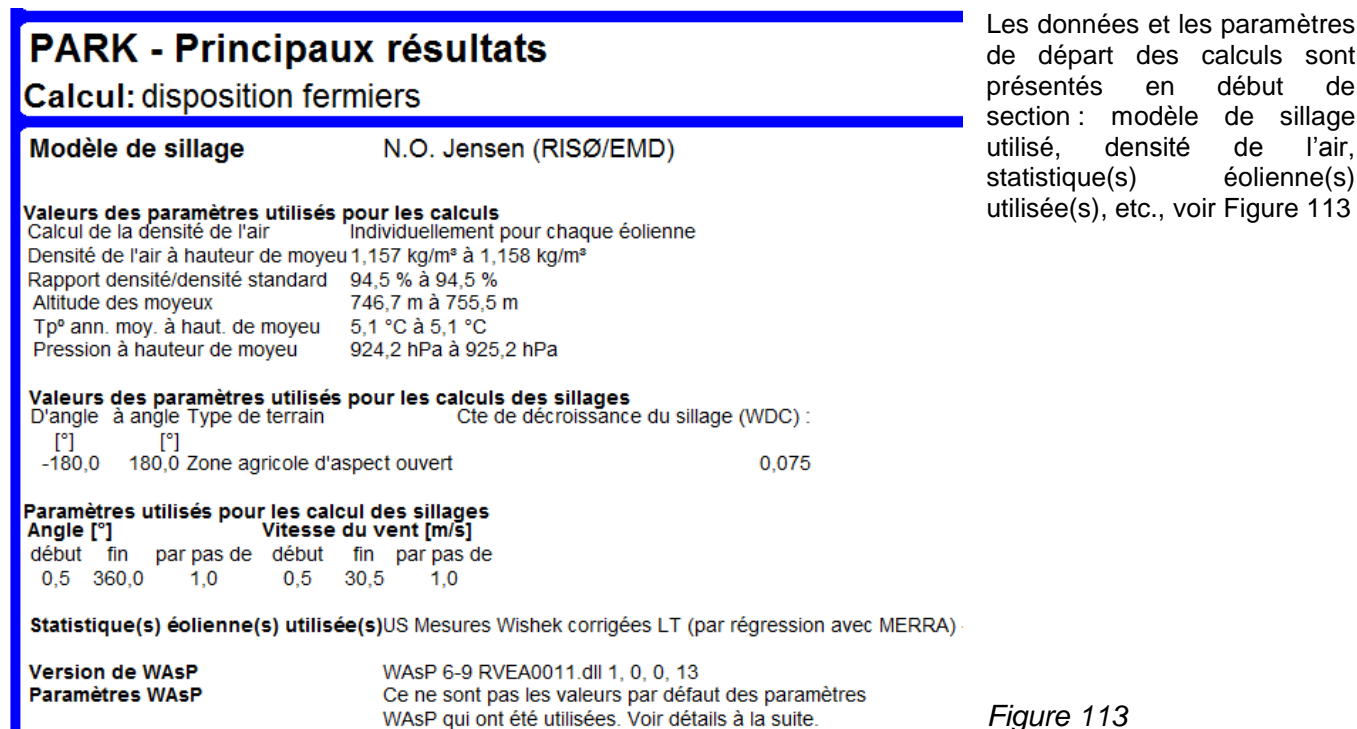


Figure 112

### 3.4.5.1 Lecture des rapports

Les extraits du rapport présentés à la suite ont seulement pour objet de mettre en lumière et d'expliquer les résultats les plus importants produits par un calcul PARK.

#### Section *Principaux résultats*



Les données et les paramètres de départ des calculs sont présentés en début de section : modèle de sillage utilisé, densité de l'air, statistique(s) éolienne(s) utilisée(s), etc., voir Figure 113

Figure 113

Les *Valeurs témoins* sont calculées à l'emplacement de l'objet *Données-site* à la hauteur définie dans la fenêtre de paramétrage du calcul, voir Figure 114

La *Rugosité équivalente* est celle que devrait avoir un terrain plat et sans obstacles pour donner le même productible. Cette valeur dépend de la hauteur témoin choisie car l'influence de l'orographie et des obstacles sur la vitesse du vent varie avec la hauteur. Selon les versions de WAsP utilisées, 10 et supérieures ou 9 et inférieures, des différences peuvent également apparaître

Valeurs témoins à la hauteur de 50,0 m								
Données-site UTM WGS84 Fuseau: 16								
Est	Nord	Données de vent utilisées	Type	Energie vent [kWh/m <sup>2</sup> ]	Vmoy. vent [m/s]	Rugosité équivalente		
A	657 701	1 271 818	Données-site. PARK	WAsP (WAsP 6-9 for Windows RVEA0011 1, 0, 0, 13)	3 078	7,4	0,6	

Figure 114

*Productible annuel du parc*, voir Figure 115.

La situation la plus complexe est présentée dans copie d'écran de la Figure 115, c'est-à-dire un calcul avec des *Nouvelles-éoliennes* et des *Eoliennes-existantes*.

Le productible est calculé pour l'*Ensemble des éoliennes* du parc, pour les *Nouvelles-éoliennes* et pour les *Eoliennes-existantes*. De plus, la ligne *Existantes sans les Nouvelles* donne le productible des éoliennes existantes avant l'installation des nouvelles éoliennes et la ligne *Influence des Nouvelles sur les Existantes* donne la réduction du productibles des éoliennes existantes causée par les sillages des nouvelles éoliennes.

La colonne dont le titre est ici *Pertes estimées -10%* reprend le texte et le pourcentage entrés dans l'option *Réduction arbitraire libellée* de l'onglet *Principal* de la fenêtre de paramétrage du calcul.

Le *Taux d'utilisation* est le rapport des *Heures équivalentes à pleine charge* par 8760, car 1 an = 8760 heures. Dans le cas de la Figure 115, le *Taux d'utilisation* relatif à l'*Ensemble des éoliennes* du parc = 2963/8760 = 33,8%.

Les *Vmoy du vent* sont les vitesses du vent libre sans les réductions de vitesse dues aux effets des sillages.

Productible annuel du parc				Résultats spécifiques <sup>a)</sup>					
Décomposition du productible	Avec pertes	Pertes	BRUT (sans	Rendement	Taux	Prod.	Heures	Vmoy	
	sillages	estimées-10,0%	pertes)	[%]	d'utilisation	moy par	équivalentes	vent au	
	[MWh/an]	[MWh]	[MWh/an]	[%]	[%]	[MWh/an]	[Heures/an]	moyeu	
Ensemble des éoliennes	69 961,5	62 965,4	74 715,6	93,6	33,8	5 247,1	2 963	8,9	
Nouvelles-éoliennes	63 354,1	57 018,7	67 563,3	93,8	33,8	5 183,5	2 962	8,9	
Eoliennes-existantes	6 607,5	5 946,7	7 152,3	92,4	33,9	5 946,7	2 973	8,9	
Existantes sans les Nouvelles	7 152,3	6 437,1	7 152,3	100,0		6 437,1		0,0	
Influence des Nouvelles sur les Existantes	544,8	490,3							

a) A partir de Pertes estimées-10,0%

Productible annuel des 11 Nouvelles-éoliennes du parc dont la somme des puiss. nominales = 19,3 MW												
Type d'éolienne				Puiss. nominale	Diamètre rotor	Hauteur	Courbe de puissance		Productible annuel		Parc Rendement	Vmoy du vent
Liens valides	Données	Fabricant	Modèle				Etabli(e) par	Nom	Résultats	Pertes estimées-10,0%		
				[kW]	[m]	[m]				[%]	[m/s]	
2 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 849,7	5 265	95,19	8,92
3 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 733,4	5 160	92,25	8,97
4 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 694,6	5 125	92,25	8,94
5 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 788,7	5 210	93,92	8,93
6 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 720,5	5 148	92,58	8,95
7 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 616,5	5 055	92,55	8,86
8 A	Non	VESTAS	V66-1 750	1 750	66,0	67,0	EMD	Level 0 - calculated -106.2dB(A) - 04-2001	5 559,3	5 003	92,41	8,82

Figure 115

NOTE : pour qu'une *Eolienne-existante* soit considérée comme faisant partie du parc, il faut cocher l'option *Considérer que l'éolienne fait partie du parc* dans l'onglet *Statistiques* des *Propriétés de l'objet Eolienne*. Voir Figure 116.

Propriétés de l'objet Eolienne (REpower MM 70 2000 70.0 !-! moyeu: 65,0 m (TOT: 100,0 m) (1))

Position | Calques | **Eolienne(s)** | Statistiques | Visualisation | Cercles/ellipses | Production | Descrip

Type d'éolienne: REpower MM 70 2000 70.0 !-! ...

Hauteur de moyeu [m]: 65,0  Utiliser les valeurs standards

Couleur icône:  519,7 W/m<sup>2</sup>, 100,0 m hauteur totale

Considérer que l'éolienne fait partie du parc (change le rapport PARK)

Figure 116

### Section *Eoliennes-de-référence*

Quand dans un calcul PARK on introduit des *Eoliennes-existantes* dont l'option *Considérer que l'éolienne fait partie du parc* n'est pas cochée, voir Figure 116, une section supplémentaire, dont le titre est *Eoliennes-de-référence*, est introduite dans le rapport. Voir Figure 117.

Ici, l'idée est d'estimer la qualité du modèle en comparant le productible calculé avec les productions réelles des éoliennes existantes. Pour cela, il faut entrer la production réelle dans le champ *Production annuelle* de l'onglet *Statistiques* de la fenêtre *Propriétés de l'objet Eolienne*.

Le résultat de la comparaison est donné dans la colonne *Rapport réelle/calculé*, voir Figure 117.



Un *Rapport réelle/calculé* < 100%, peut être dû à un mauvais calcul mais aussi aux pertes électriques non prises en compte, à des périodes d'indisponibilité des éoliennes supérieures à celles estimées, à des mesures vent et des productions non relevées sur des périodes concomitantes. C'est pour cela que les productions entrées doivent être préalablement corrigées.

<b>PARK - Eoliennes-de-référence</b>											
Calcul: disposition fermiers											
<b>Productible annuel des 1 Eoliennes-de-référence dont la somme des puiss. nominales = 2,0 MW</b>											
Type d'éolienne		Courbe de puissance			Prod. calculé		Production annuelle		Rapport		
Liens Données valides	Fabricant	Modèle	Puiss. nominale	Diamètre rotor	Hauteur	Établi(e) par	sans les Niles-éol	réelle	réelle / calculé		
			[kW]	[m]	[m]	Nom	[MWh]	[MWh]	[%]		
12 A	Oui	REpower	MM 70-2 000	2 000	70,0	65,0	EMD	Level 0 -- Windtest - 01-2003	7 152,3	6 957,0	97

Figure 117

### Section *Analyse du productible*

Dans cette section sont présentés les résultats détaillés des calculs de productible. Voir Figure 118. L'analyse est faite par secteur par secteur. Pour chaque secteur, les effets des obstacles, de l'orographie et des sillages sont exprimés en MWh mais aussi en pourcentages du productible afin de mieux se rendre compte de leur importance respective et d'orienter, ainsi, les actions pour améliorer le rendement du parc.

Le *Rendement* est le rapport entre l'énergie fournie par les éoliennes et l'énergie du vent traversant les surfaces balayées par les rotors des éoliennes. Le rendement est beaucoup plus faible dans les sites où les vitesses du vent sont très élevées. Cette valeur ne donne pas une indication directe sur la qualité du site, par contre elle est utile pour comparer différents types d'éoliennes dans les conditions spécifiques du site.

Les *Heures/an de fonctionnement* indiquent la durée annuelle de fonctionnement des éoliennes (nb max = 8760 heures = 1 an). Cette information peut être utilisée, par ex., pour calculer la durée du papillotement des ombres des éoliennes.

L'*Equivalence à pleine charge* exprime le productible en heures de production des éoliennes fonctionnant à puissance nominale.

NOTE : par défaut, le rapport PARK montre seulement l'analyse du productible pour l'ensemble des *Nouvelles-éoliennes* et pour l'ensemble des *Eoliennes-existantes*.

En sélectionnant *Analyse du productible*, dans le *Sommaire des Options de présentation* du rapport, s'affiche la liste des éoliennes qui permet de sélectionner les machines dont l'*Analyse du productible* devra être présentée dans le rapport; dans ce cas, l'analyse présente, en plus, les paramètres A et k du vent à hauteur du moyeu de l'éolienne.

<b>PARK - Analyse du productible</b>														
Calcul: disposition fermiers Eolienne(s): Toutes les Nouvelles-éoliennes, densité de l'air comprise entre 1,157 kg/m³ - 1,158 kg/m³														
<b>Analyse par secteur</b>														
Secteur	0 N	1 NNE	2 ENE	3 E	4 ESE	5 SSE	6 S	7 SSO	8 OSO	9 O	10 ONO	11 NNO	Total	
Prod. déterminé par la rugosité	[MWh]	10 300,1	3 833,2	2 041,0	2 413,2	2 363,8	3 928,5	9 046,7	7 067,2	4 128,8	3 580,3	5 215,8	9 273,4	63 192,1
-Réduction due aux obstacles	[MWh]	5,5	1,1	0,0	0,0	0,0	0,2	2,5	8,0	6,0	2,2	7,8	7,2	40,5
+Effets de l'orographie	[MWh]	144,3	198,2	240,9	403,6	398,2	411,2	141,7	230,0	472,7	631,7	690,3	448,8	4 411,6
-Réduction due aux sillages	[MWh]	1 386,3	307,6	66,0	0,0	8,3	252,0	1 281,8	451,0	128,6	0,0	14,0	313,6	4 209,2
<b>Productible résultant</b>	<b>[MWh]</b>	<b>9 052,6</b>	<b>3 722,8</b>	<b>2 215,9</b>	<b>2 816,7</b>	<b>2 753,7</b>	<b>4 087,5</b>	<b>7 904,1</b>	<b>6 838,2</b>	<b>4 467,0</b>	<b>4 209,8</b>	<b>5 884,4</b>	<b>9 401,3</b>	<b>63 354,1</b>
Productible spécifique	[kWh/m²]													1 683
Productible spécifique	[kWh/kW]													3 291
Réduction due aux obstacles	[%]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06
Effets de l'orographie	[%]	1,4	5,2	11,8	16,7	16,8	10,5	1,6	3,3	11,4	17,6	13,2	4,8	6,98
Réduction due aux sillages	[%]	13,3	7,6	2,9	0,0	0,3	5,8	14,0	6,2	2,8	0,0	0,2	3,2	6,23
Rendement	[%]	27,4	32,9	34,1	36,3	37,6	36,9	29,8	31,4	33,7	36,6	33,4	29,7	31,8
Heures/an fonctionnement	[Heures/an]	1 166	611	372	470	513	706	1 013	775	556	580	676	1 017	8 455
Equivalence à pleine charge	[Heures/an]	470	193	115	146	143	212	411	355	232	219	306	488	3 291

Figure 118

## Section *Analyse des courbes de puissance*

Cette section permet l'analyse de la courbe de puissance de chaque éolienne du projet. Voir Figure 119.

*Courbe de puissance* : présente la courbe de puissance de l'éolienne extraite de la *Bibliothèque d'éoliennes*. *Ct* est le coefficient de traînée aérodynamique qui est utilisé pour calculer les sillages.

*Courbe de puissance corrigée* : présente la courbe de puissance utilisée pour les calculs. Elle est corrigée en fonction de la densité de l'air à l'altitude du moyeu de l'éolienne.

La colonne *Energie* présente le productible de l'éolienne par classe de vent ; les colonnes *Cumul* présentent le productible cumulé, ainsi l'exemple de la Figure 119 montre que l'intervalle des vitesses [0,0 - 5,5m/s] ne génère que 1,3% du productible.

*Comparaison avec les courbes HP* : ce tableau compare les productibles annuels de l'éolienne avec ceux d'une éolienne générique. Les courbes de puissances des machines génériques (courbes HP) sont souvent plus pertinentes que les courbes mesurées dont l'incertitude de la mesure peut être très importante. Ces courbes de puissance génériques résultent de l'étude de nombreuses machines groupées en 3 types :

- machines avec régulation de puissance « stall », mono-génératrice et vitesse de rotation fixe.
- machines avec régulation de puissance « stall », double-génératrice ou vitesse de rotation variable.
- machines avec régulation de puissance « pitch » double-génératrice ou vitesse de rotation variable.

Si aucune valeur *Courbe HP* n'est présentée, c'est qu'il n'existe aucune machine générique comparable à l'éolienne utilisée.

Pour plus de détails sur les courbes HP reportez-vous au 3.5.2.

### NOTES :

La comparaison doit se faire avec la courbe de puissance donnant la puissance nominale (sans bridage).

Des écarts de productibles importants sont le signe d'une anomalie dans la courbe de puissance donnée par le fabricant.

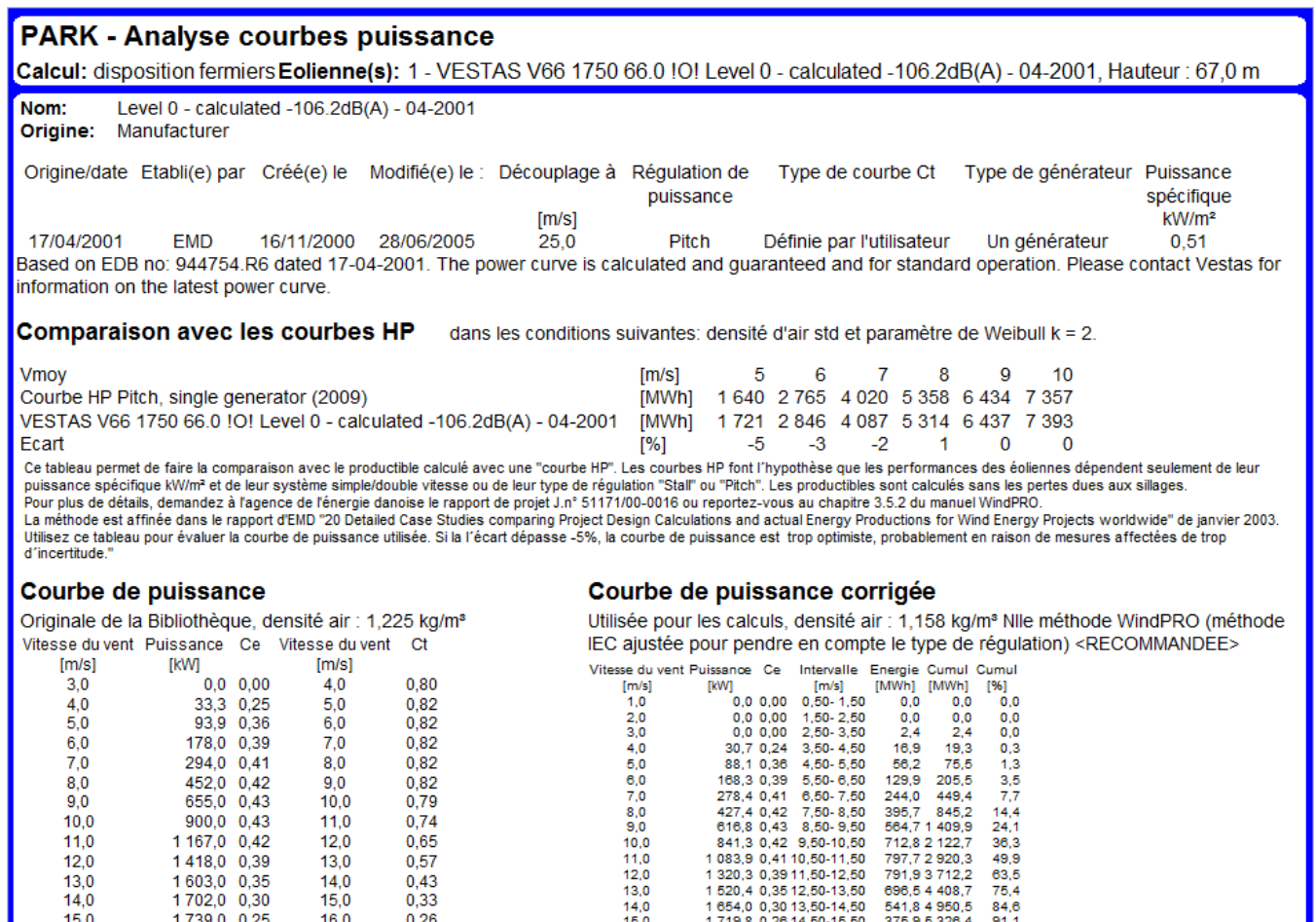


Figure 119

Section **Analyse du vent**

Par défaut, cette section du rapport apparaît comme montré à la Figure 120.

*Référence* donne les caractéristiques du vent, ici, à de 67m de hauteur, à l'emplacement de l'objet *Données-site* ayant pour nom WAsP-Interface, en faisant l'hypothèse que terrain est plat et que sa classe de rugosité = 1. Ces conditions de terrain ont été choisies car elles sont les meilleures que l'on puisse rencontrer à terre, elles ont pour objet de mettre en évidence l'influence du terrain sur les conditions de vent.

*Site étudié* donne les caractéristiques du vent, ici, à de 67m de hauteur, à l'emplacement de l'objet *Données-site* ayant pour nom WAsP-Interface, en considérant les caractéristiques réelles du terrain. Si les conditions de vent du *Site étudié* sont meilleures que celle de la *Référence* cela indique qu'il y a des effets d'accélération du vent par le relief.

Dans le cas présenté à la Figure 120, on peut remarquer l'effet positif du terrain dans les secteurs E et ENE.

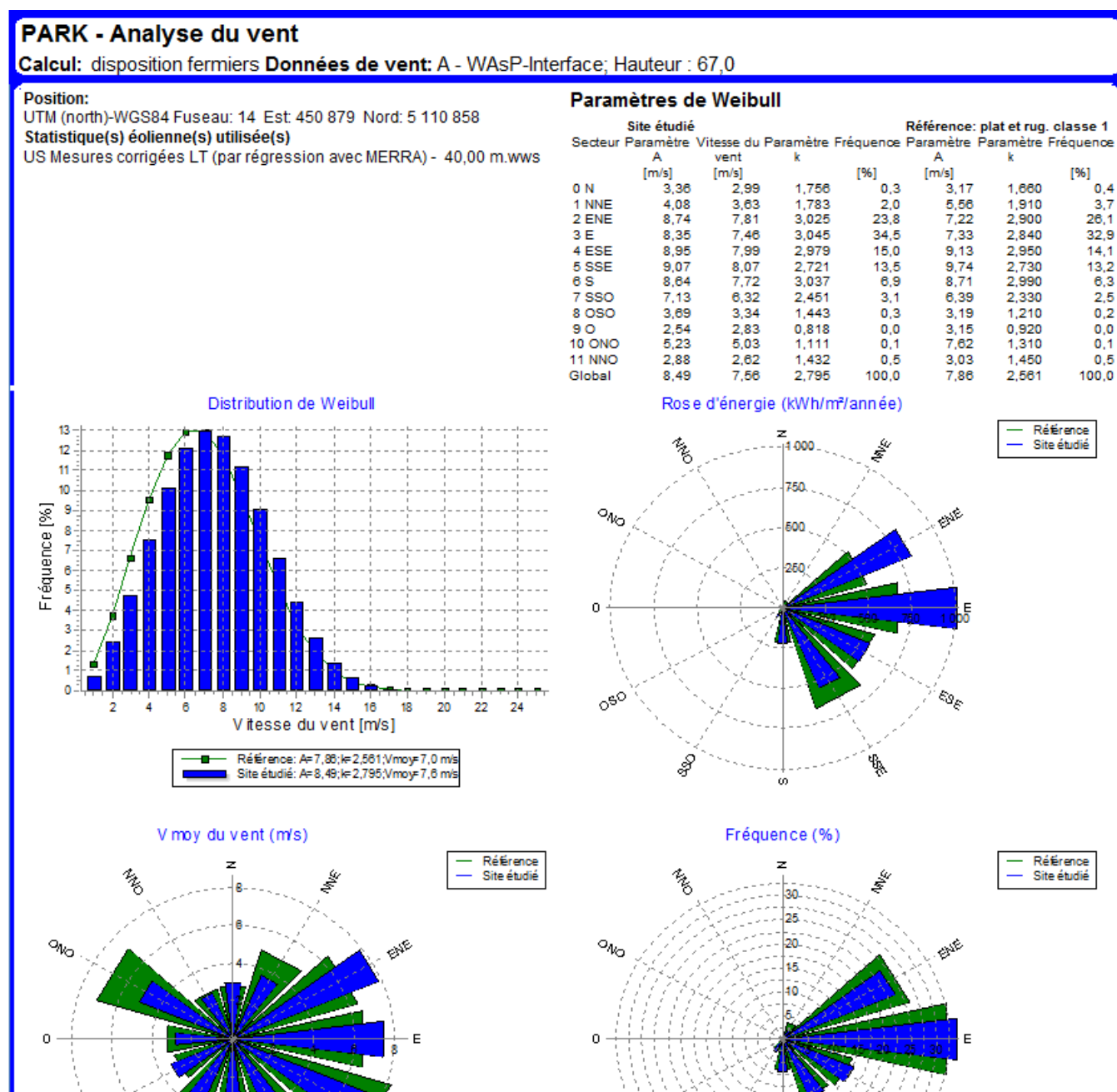


Figure 120

Alternativement, cette section peut donner une information détaillée sur les conditions de vent du *Site étudié* sans introduire la comparaison avec la *Référence* décrite antérieurement, voir Figure 121.

Le choix se fait en sélectionnant *Analyse du vent*, dans le *Sommaire des Options de présentation* du rapport.

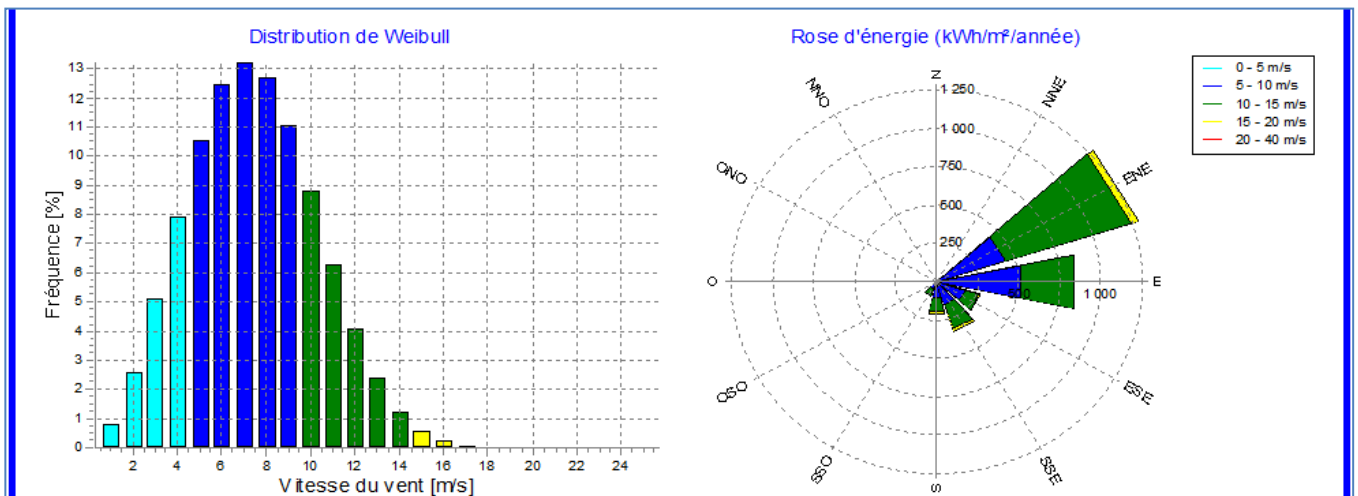


Figure 121

### Section *Distance entre les éoliennes*

<b>PARK - Distances entre les éoliennes</b>					
<b>Calcul: disposition fermiers</b>					
<b>Distances entre les éoliennes</b>					
Z	Eol. la plus proche	Z	Distance horizontale	Distance en diamètres rotor	Distance en diamètres rotor
[m]		[m]	[m]	(petit rotor)	(grand rotor)
1 682,8	2 685,8	2 685,8	256	3,9	3,9
2 685,8	1 682,8	1 682,8	256	3,9	3,9
3 685,8	4 685,8	4 685,8	279	4,2	4,2
4 685,8	3 685,8	3 685,8	279	4,2	4,2
5 688,5	6 684,4	6 684,4	278	4,2	4,2
6 684,4	5 688,5	5 688,5	278	4,2	4,2
7 679,7	8 685,8	8 685,8	316	4,8	4,5
8 685,8	7 679,7	7 679,7	316	4,8	4,5
9 685,8	8 685,8	8 685,8	321	4,9	4,6
10 685,8	11 685,8	11 685,8	306	4,6	4,6
11 685,8	12 686,7	12 686,7	299	4,5	4,5
12 686,7	11 685,8	11 685,8	299	4,5	4,5
<b>Min</b> 679,7	<b>679,7</b>	<b>679,7</b>	<b>256</b>	<b>3,9</b>	<b>3,9</b>
<b>Max</b> 688,5	<b>688,5</b>	<b>688,5</b>	<b>321</b>	<b>4,9</b>	<b>4,6</b>

Dans cette partie est indiquée, pour chaque éolienne, la distance la séparant de l'éolienne voisine la plus proche.

La distance est indiquée en mètres ou en diamètres de rotor. Si les éoliennes ont des rotors de diamètres différents, la distance est exprimée en nombre de diamètres de *grand rotor* et en nombre de diamètres de *petit rotor*, voir Figure 122.

Figure 122

Section ***Distance entre les éoliennes***

Cette partie donne des informations sur les *statistiques éoliennes* utilisées pour les calculs. L'information complète n'est enregistrée qu'avec les statistiques au format .wvs générées avec les versions 2.8 et postérieures de WindPRO, voir Figure 123.

**PARK - Infos statistiques éoliennes**

**Calcul:** disposition fermiers

**Principales infos relatives à la statistique éolienne**

Fichier	D:\WindPRO Data\Exercices_formation\3-VENT et PRODUCTIBLES\Wishek_bu\US Mesures corrigées LT (par régression avec MERRA) - 40,00 m.wvs
Nom	Mesures Wishek corrigées LT (par régression avec MERRA) - 40,00 m
Pays	États-Unis
Origine	USER
Coord. mât mesures	UTM (north)-WGS84 Fuseau: 14 Est: 450 366 Nord: 5 110 712
Créé(e) le	29/11/2012
Modifié(e) le :	26/07/2013
Secteurs	12
Version de WAsP	WAsP 6-9 RVEA0011.dll 1, 0, 0, 13

**Informations supplémentaires**

<b>Données d'entrée</b>	Mesures corrigées LT (par régression avec MERRA)
<b>De</b>	31/12/1991
<b>à</b>	31/12/2002
<b>Durée des mesures</b>	132,0 mois
<b>Taux d'acquisition</b>	99,9 %
<b>Durée effective des mesures</b>	131,9 mois

**Commentaire**

Pour obtenir les meilleurs résultats, les calculs des statistiques éoliennes et les calculs utilisant ces mêmes statistiques doivent être fait avec le même modèle et le même paramétrage du modèle. Les versions antérieures à WAsP 10.0 utilisent le même modèle, les suivantes utilisent des évolutions affectant les statistiques éoliennes. De la même manière, les calculs WAsP-CFD devraient toujours utiliser des statistiques calculées avec WAsP-CFD.

Figure 123

Section ***Turbulences***

Ces parties du rapport sont décrites dans l'annexe « Introduction to wake modelling... ».

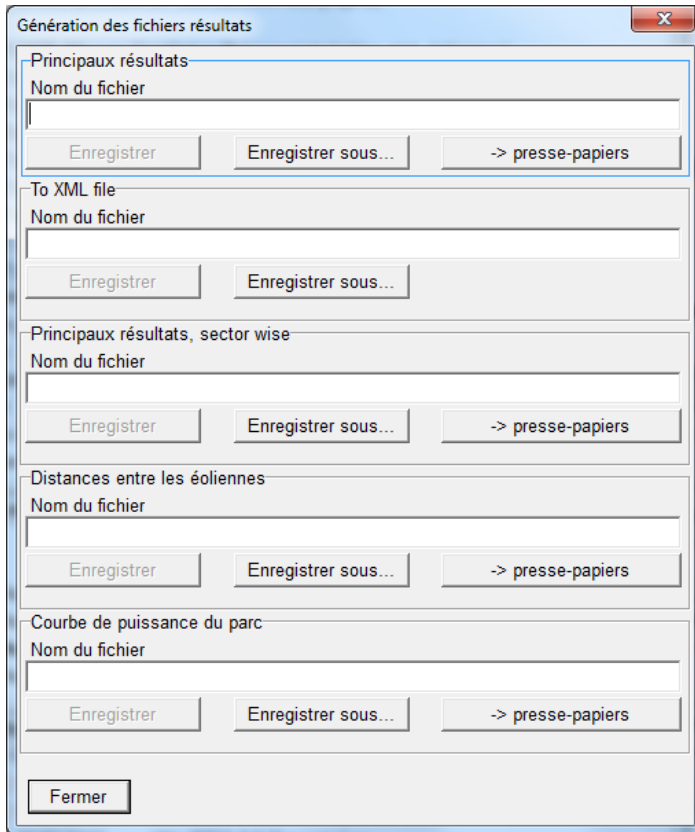
### 3.4.5.2 Enregistrer les résultats dans des fichiers

Cette option est très pratique pour exporter les résultats des calculs PARK vers une feuille de calcul afin de réaliser des analyses supplémentaires.

On accède à cette possibilité via le bouton *Résultats calculs -> fichiers* de la fenêtre *Options de présentation* du rapport ou bien choisissant l'option *Résultats calculs -> fichiers* dans le menu contextuel qui s'ouvre en faisant un clic droit sur le titre du rapport.

Les résultats peuvent être copiés dans le presse-papiers de Windows et collés directement dans Excel ou enregistrés sous forme fichiers texte, voir Figure 124.





Les propositions présentées dans cette fenêtre varie en fonction des calculs sélectionnés dans le paramétrage du calcul PARK.

Figure 124

#### Enregistrement des *Principaux résultats* d'un calcul PARK

Les deux premières colonnes du tableau ci-dessous sont la transposition des *Principaux résultats* d'un calcul PARK auxquelles une colonne d'explications a été ajoutée.

	Exemple de contenu	Explication
Type	Nouvelle	Nouvelle ou existante
Fichier .lib	D:\windPRO Data\Projects\ ...\FR 48m.wws.lib	Localisation du fichier de la statistique éolienne utilisée
Est	578.391	Longitude *)
Nord	5.540.176	Latitude *)
Z	581	Altitude
Données valides	Oui	Se réfère à courbe de puissance
Fabricant	REpower	
Modèle	MM82	
Puiss. nominale	2.000	
Diamètre du rotor	82	Diamètre du rotor
Hauteur de moyeu	80	Hauteur du moyeu
Description	REpower MM 82 2000 82.0	Texte de la colonne <i>Description</i> de la liste d' <i>Objets</i>
Etabli(e) par	EMD	Se réfère à courbe de puissance
Nom	Level 0- guaranteed- 06/2005	Se réfère à courbe de puissance
Label utilisateur	Eol-1	Label utilisateur de la liste d' <i>Objets</i>

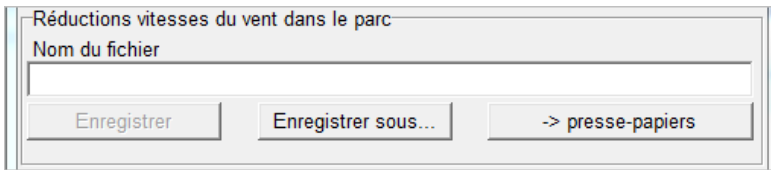
Résultats	2 664,3	Productible prenant en compte les pertes dues aux sillages
Rendement	97,1	Rendement du parc
Fact. correction stat. éol	1	Se réfère à la statistique éolienne
Rugosité équivalente	1,8	Classe de rugosité sur site plat, sans obstacles qui fourniraient le même productible
Vmoy. vent	6,1	Calculée à la hauteur du moyeu
Valeur HP	2767,3	Productible calculé à partir de la courbe de puissance HP
Prod. calculé sans les Nlles-éol.	0	Productible des éoliennes existantes seules
Production annuelle réelle	0	Productible mesuré sur les éoliennes existantes
Rapport réelle / calculé		Prod mes. /prod. Calc. des éoliennes existantes
A (global)	6	Paramètre Weibull A tous secteurs confondus
k (global)	1,7	Paramètre Weibull k tous secteurs confondus
A (0)	9,1	Paramètre Weibull A du secteur 0 (nord)
k (0)	1,9	Paramètre Weibull k du secteur 0 (nord)
f (0)	9,3	Fréquence du vent dans le secteur 0 (nord)
A (1)	5	Paramètre Weibull A du secteur 1
k (1)	1,9	Paramètre Weibull k du secteur 1
f (1)	5	Fréquence du vent dans le secteur 1
... autres secteurs		
Densité air	1,145	Densité au niveau du moyeu utilisée pour les calculs
Translation de hauteur	0	Valeur retranchée à la hauteur de moyeu
Réduction due aux obstacles	0	Réduction en % du productible due aux effets des obstacles.
Effets de l'orographie	7,12	Effet en % du relief sur le productible.
Sensibilité	2,01	Variation en % du productible pour une variation de 1% de la vitesse moyenne du vent.

Note : les résultats grisés ne sont disponibles qu'à partir de WindPRO2.8.

La sensibilité est utile lors du calibrage du productible en fonction des productions des éoliennes existantes. La hauteur de moyeu de ces dernières sera en général inférieure et par conséquent une sensibilité moindre. La sensibilité peut être utilisée pour convertir l'écart entre le productible et la production réelle des éoliennes existantes en écart de la vitesse du vent qui, à son tour, pourra être utilisé pour corriger les productibles calculés des nouvelles éoliennes.

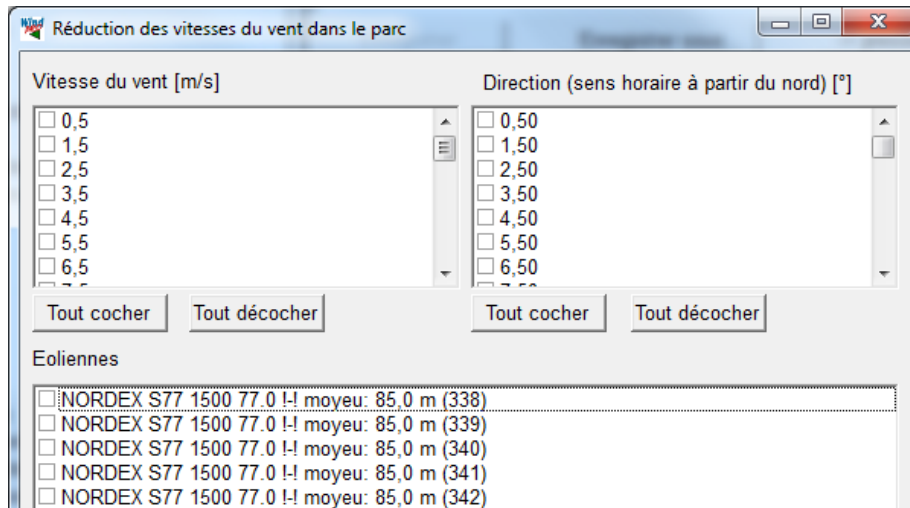
\*) le système de coordonnées utilisé est indiqué dans la 1ère ligne du fichier.

Enregistrement de la **Réduction des vitesses du vent dans le parc**



Le bouton *Enregistrer sous...* crée un fichier présentant de manière exhaustive les réductions des vitesses du vent dans le parc.

Par contre, le bouton *-> presse-papiers* ouvre la fenêtre de la de la Figure 125.



Dans cette fenêtre on peut limiter la présentation des réductions des vitesses sur des *Eoliennes*, des classes de *Vitesse du vent* et des *Directions* particulières.

Figure 125

Les résultats après avoir été copiés sur une feuille de calcul se présentent comme sur la Figure 126. Pour chaque éolienne sélectionnée, le tableau donne la vitesse réduite du vent en fonction des classes de vitesse de vent et des directions sélectionnées dans la fenêtre de la Figure 125.

Cela permet, par exemple, de corriger les mesures issues d'un mât de mesure situé dans un parc éolien afin de pouvoir les utiliser comme si elles avaient été faites sans éoliennes autour du mât.

UTM (north)-WGS84 Fuseau: 14 Est: 450414 Nord: 5111520 <b>VESTAS V66</b> 1750 66.0 !O! moyeu: 67,0 m (TOT: 100,0 m) (2)																							
Dir.\Vit.	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5	23,5	24,5		
0,5	3,73	4,54	5,36	6,19	7,01	7,89	8,87	9,94	11,07	12,3	13,58	14,75	15,86	16,95	18,02	19,07	20,12	21,16	22,19	23,21	24,24		
1,5	3,81	4,64	5,49	6,34	7,18	8,07	9,06	10,12	11,23	12,44	13,68	14,83	15,93	17,01	18,07	19,12	20,16	21,19	22,22	23,25	24,27		
2,5	3,9	4,75	5,62	6,49	7,35	8,26	9,24	10,29	11,39	12,57	13,78	14,92	16,01	17,08	18,13	19,17	20,21	21,23	22,26	23,28	24,3		
3,5	3,99	4,86	5,75	6,63	7,51	8,43	9,42	10,47	11,55	12,71	13,89	15	16,08	17,14	18,18	19,22	20,25	21,27	22,29	23,31	24,33		
4,5	4,07	4,97	5,87	6,78	7,68	8,61	9,6	10,64	11,71	12,84	13,99	15,08	16,15	17,2	18,23	19,26	20,29	21,31	22,33	23,34	24,35		
5,5	4,15	5,07	5,99	6,91	7,83	8,78	9,77	10,8	11,86	12,96	14,08	15,16	16,21	17,25	18,28	19,31	20,33	21,35	22,36	23,37	24,38		
355,5	3,48	4,22	5	5,77	6,54	7,37	8,35	9,44	10,61	11,92	13,28	14,5	15,66	16,77	17,87	18,94	20	21,05	22,09	23,12	24,15		
356,5	3,48	4,22	5	5,77	6,53	7,37	8,35	9,44	10,61	11,92	13,28	14,5	15,66	16,77	17,87	18,94	20	21,04	22,09	23,12	24,15		
357,5	3,5	4,25	5,03	5,81	6,58	7,42	8,39	9,48	10,65	11,95	13,3	14,52	15,68	16,79	17,88	18,95	20,01	21,05	22,09	23,13	24,16		
358,5	3,56	4,33	5,12	5,92	6,7	7,55	8,53	9,61	10,77	12,05	13,38	14,59	15,73	16,84	17,92	18,98	20,04	21,08	22,12	23,15	24,18		
359,5	3,64	4,43	5,24	6,05	6,85	7,72	8,7	9,77	10,91	12,17	13,47	14,66	15,79	16,89	17,97	19,03	20,08	21,12	22,15	23,18	24,21		

Figure 126

Une information détaillée sur les résultats enregistrés à partir *Courbe de puissance du parc*, *Intensité des turbulences subies par les éoliennes*, *Vitesses du vent dans le sillage d'une éolienne isolée* est donnée dans l'annexe « Introduction to wake modelling.... ».

## 3.5 Pertes, incertitudes et vérifications

### 3.5.0 Introduction

Effectuer un calcul de productible en utilisant un logiciel moderne est un travail fondamental, mais insuffisant. Compte tenu de la taille croissante des projets, et par conséquent des investissements mis en jeu, il est essentiel de pouvoir auditer les résultats des calculs, ce que permet WindPRO en générant des rapports détaillés.

Le développement des projets éoliens se poursuit mais souvent dans des zones où les ressources éoliennes sont de moindre qualité. Cette évolution fait qu'une analyse très fine de la viabilité économique d'un projet est devenue indispensable.

Pour répondre à ce besoin WindPRO propose le module PERTES & INCERTITUDES qui permet d'estimer les pertes et les incertitudes sur le productible nécessaires à la prise de décision par l'investisseur.

Ce chapitre a simplement pour objet de rappeler que le travail n'est pas terminé quand le productible a été calculé et d'attirer l'attention sur les principales sources de pertes et d'incertitudes dont le traitement détaillé se fait dans le module PERTES & INCERTITUDES, voir section 12.

### 3.5.1 Pertes et incertitudes

#### 3.5.1.0 Pertes

Les pertes doivent être estimées et déduites des productibles calculés avec PARK. A cet effet, il est vivement recommandé d'utiliser le module PERTES & INCERTITUDES. A défaut, pour donner un ordre de grandeur, selon le site, une réduction de 5 à 15% doit être appliquée au productible calculé avec PARK (qui inclut déjà les pertes dues aux sillages) pour obtenir le productible net. La suite indique les principaux postes de pertes :

**Les pertes dues aux sillages** sont comptées dans les productibles calculés avec PARK.

**Les pertes électriques** sont de l'ordre de 2% dont 1% est dû aux transformateurs intégrés aux éoliennes qui, en général, ne sont pas prises en compte dans les courbes de puissance (habituellement établies en sortie du générateur). Le module eGRID permet, entre autres, de calculer toutes ces pertes.

**L'indisponibilité des éoliennes** qui se traduit typiquement par un taux de pertes de 3-5% pour les machines moderne. Cette valeur est fortement liée au type de contrat de support signé avec le fabricant. Dans les pays industrialisés la disponibilité du réseau électrique est pratiquement de 100%, mais dans certains pays le réseau électrique est souvent défaillant ce qui peut accroître considérablement les pertes.

**La dégradation des pales et la glace** qui réduisent leur rendement aérodynamique.

**L'hystérésis des recouplages aux hautes vitesses de vent.** Si la vitesse maximale admissible du vent est dépassée il y a découplage de l'éolienne. Le recouplage se fait en suivant un protocole qui fait que l'éolienne ne produit pas durant un certain temps même si la vitesse du vent est revenue dans la plage opérationnelle de la machine. D'après notre expérience, au Danemark, chaque fois qu'il y a découplage de l'éolienne à haute vitesse la perte est (grossièrement) estimée à 0,3% du productible.

**Bridage des éoliennes.** Les éoliennes doivent parfois être arrêtées à cause de l'intensité des turbulences (éoliennes implantées trop près les unes des autres dans certaines directions du vent), à cause des papillotements des ombres portées ou utilisées à puissance réduite à cause du bruit (si il y a des habitations dans leur voisinage).

Enfin les résultats peuvent être biaisés, à cause du RIX (voir 3.4.0.2), où à cause de certaines courbes de puissance dont on sait, par expérience, qu'elles sont incorrectes. Ces biais doivent être corrigés pour obtenir les productibles net.

### 3.5.1.1 Incertitudes

Il est vivement recommandé d'utiliser le module PERTES & INCERTITUDES pour estimer les incertitudes. A défaut, la suite pourra guider l'utilisateur ne disposant pas de ce module.

Les incertitudes suivantes doivent en général être considérées dans un calcul de productible (les valeurs entre parenthèses représentent les incertitudes dans des bonnes conditions) :

- Données de vent / Statistiques éoliennes (5%)
- Correction long terme des données de vent avec MCP (5%)
- Modèle d'extrapolation (verticale et horizontale) à partir de la description du terrain c.à.d. rugosité, orographie et obstacles (5%)
- Courbes de puissance (5% si elles ont été vérifiées, voir 3.5.2)

Dans le cas des très grands parcs, l'incertitude affectant les pertes dues aux sillages peut être considérable.

On considère que les incertitudes sont indépendantes et décorréées. Dans ces conditions l'incertitude globale est égale à la racine carrée de la somme leur carré.

En reprenant les valeurs précédentes l'incertitude globale =  $(5^2+5^2+5^2+5^2)^{1/2} = 100^{1/2} = 10\%$

Le changement climatique est une source d'incertitude récemment prise en compte. Auparavant (jusqu'à 2005), il était communément admis que 10 années de données étaient suffisantes pour être représentatives du long terme.

Dans les pays du nord de l'Europe, étant donné leur climatologie particulière, on sait que cette durée est très insuffisante. Différentes analyses semblent indiquer que 30 années de données sont nécessaires pour caractériser les conditions de vent à long terme. Disposer de 30 années de données n'est cependant pas une garantie totale et il est recommandé d'ajouter une incertitude de 5% pour tenir compte du changement climatique au cours des futures 20 années d'exploitation du parc.

Remarque : si on considère que l'incertitude globale sur le productible net se distribue normalement, que sa moyenne est le productible net et que son écart-type est la valeur de l'incertitude globale alors on sait calculer la probabilité de dépasser une certaine production. Si reprend l'exemple antérieur où l'incertitude globale = 10% (du productible net), la probabilité dépasser un productible 0,9 x le productible net (productible net – 1 écart-type) est égale à 84%, cette production s'appelle le P84, le productible net calculé est donc le P50. On peut calculer les Pxx à partir des tables ou des courbes donnant la probabilité cumulée (se rapportant à une distribution normale), voir Figure 127.

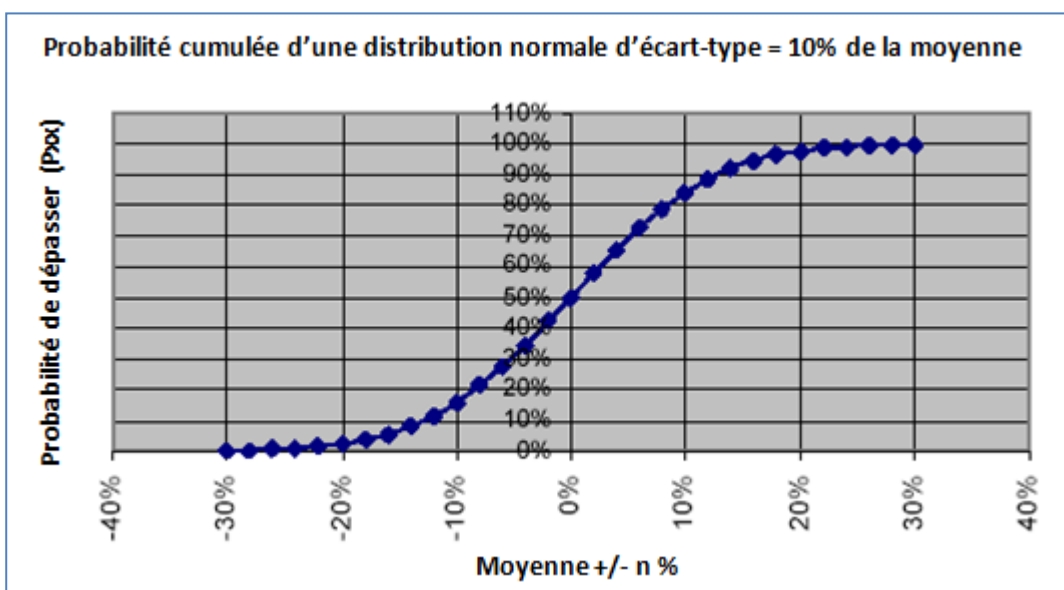


Figure 127



Même si les calculs sont confirmés par les productions réelles cela ne veut pas dire qu'elles sont représentatives du long terme. Notre expérience au Danemark montre qu'à long terme la production peut varier de :

- +/- 10% par rapport à la production mesurée sur 1 année,
- +/- 5% par rapport à la production moyenne mesurée sur 2 années.

Il est généralement admis que l'estimation de la production peut être faite avec une incertitude inférieure 8% (au Danemark ou dans conditions équivalentes).

C'est le cas pour 95% des calculs effectués au Danemark au cours de ces dernières années.

Deux choses sont particulièrement importantes pour réduire l'incertitude :

- Le retour d'expérience des installations fonctionnant depuis plusieurs années dans la zone du projet
- La maîtrise des outils de calculs et la comparaison continue des résultats calculés avec la réalité.

On peut donc espérer que 95% des productibles calculés par des utilisateurs ou des consultants expérimentés au Danemark et en Allemagne soient contenus dans une fourchette de +/-10%.

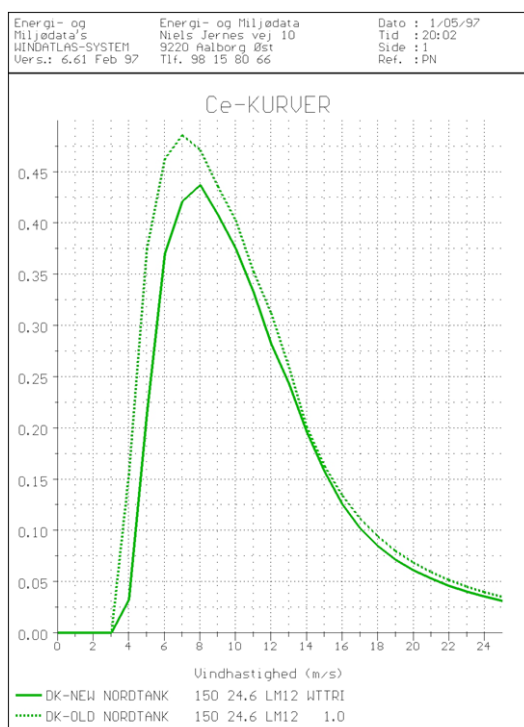
Pour des nouvelles régions, on peut s'attendre à une sensible augmentation de l'incertitude, en particulier si le relief est complexe. Malheureusement il n'y a pas de guide à suivre pour limiter ces incertitudes. La réduction de l'incertitude passe par des mesures sur site les plus longues possibles avec plusieurs mâts et au plus près de la hauteur de moyeu des éoliennes.

Remarque : incertitude et erreur humaine ne sont pas la même chose. Si les données de départ sont erronées, la différence entre le productible calculé et la future production peut être immense !

### 3.5.2 Vérification des courbes de puissance

Un des points clé à vérifier lors de l'examen d'une courbe de puissance est la valeur maximale de la courbe  $C_e$  (paramètre sans dimension). Si sa valeur dépasse 0,45 il faut être prudent, même si on a pu mesurer des valeurs atteignant 0,49.

Actuellement, le rendement des pales, l'efficacité des systèmes de pilotages et l'utilisation de générateurs à aimants permanents permet d'atteindre des valeurs de 0,47-0,48.

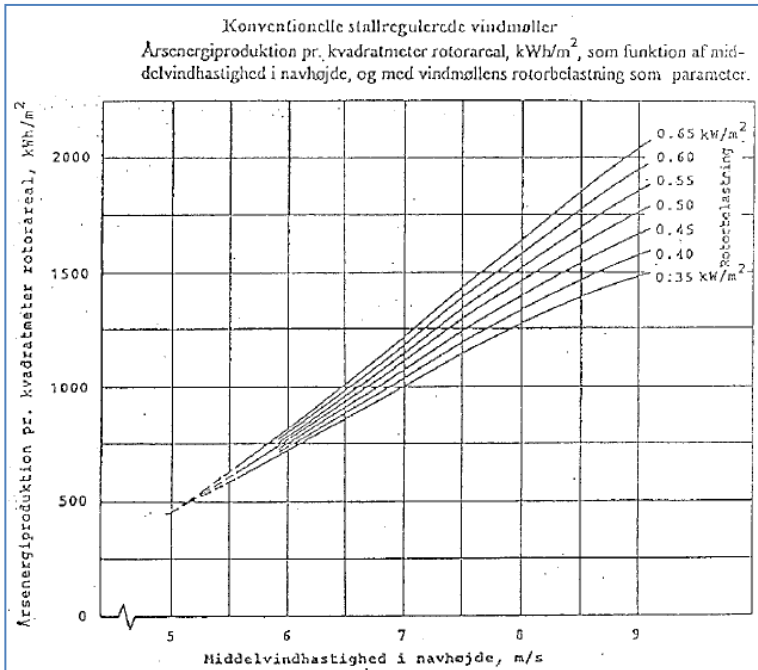


La comparaison des courbes  $C_e$  d'éoliennes de même technologie et de taille similaire est aussi un bon moyen de détecter des anomalies.

Le graphique Figure 128 montre la comparaison de deux courbes  $C_e$ . Celle en pointillé aurait dû être mise en doute d'emblée à cause du  $C_e$  max irréaliste.

Figure 128

Une autre moyen de contrôler une courbe de puissance et de comparer son productible avec celui obtenu en utilisant la courbe « Helge Petersen » (HP) correspondante.



Les courbes « HP » sont présentées à la Figure 129.

Les valeurs données sont le résultat de l'étude d'un grand nombre d'éoliennes allant de 150kW à 2MW.

Les courbes de puissance HP ont été révisées en 2001. Les valeurs des courbes HP sont données pour chaque éolienne de la bibliothèque, on peut les visualiser en ouvrant la fiche de l'éolienne.

Figure 129

HP curve comparison							
Vmean	[m/s]	5	6	7	8	9	10
HP value	[MWh]	206	331	464	578	665	754
WT/TRIPOD	1.225 25.00 -0.80 [MWh]	206	331	457	572	671	749
Check value	[%]	0	0	2	1	-1	1

La capture d'écran, ci-contre, est extraite de la fiche d'une éolienne de la bibliothèque. Elle montre la comparaison des productibles calculés à partir de la courbe de puissance de l'éolienne avec celle de la courbe « HP » correspondante.

Par rapport à la version de WindPRO2.4, l'expérience a conduit à corriger les courbes « HP » des éoliennes de moins de 150 kW comme suit :

- moins de 50kW réduction par application d'un facteur 90%
- entre 50kW et 150kW, réduction par application d'un facteur variant linéairement de 90% à 100% entre 50 et 150 kW.
- pour les éoliennes à contrôle de puissance « pitch » avec une seule génératrice, réduction de 4% pour les vitesses moyennes de vent inférieures à 7m/s.

Avec la version 2.8 de WindPRO de nouvelles typologies de machines ont été ajoutée, il y maintenant :

Stall – 1 générateur	Pitch – 1 générateur
Stall – 2 générateurs/vitesse variable	Pitch – 2 générateurs (actualisée en 2012)
	Pitch – vitesse variable (introduite en 2012)

Note : lorsqu'on fait appel aux comparaisons avec les courbes « HP » il est TRÈS important que, dans la fiche de l'éolienne, le champ *Type de générateur* soit correctement renseigné. En effet, « 2 générateurs » et « vitesse variable » ont été dissociées en deux typologies distinctes depuis WindPRO2.8, ce qui rend mieux compte de la technologie des machines des années 2000-2012.

Ces actualisations se fondent sur une analyse approfondie, réalisée par Per Nielsen, de 23 courbes de puissance représentatives des années 2000-2012 à partir desquelles ont été établies les courbes génériques servant aux comparaisons. La Figure 130 montre le résultat pour la typologie « Pitch – vitesse variable ».

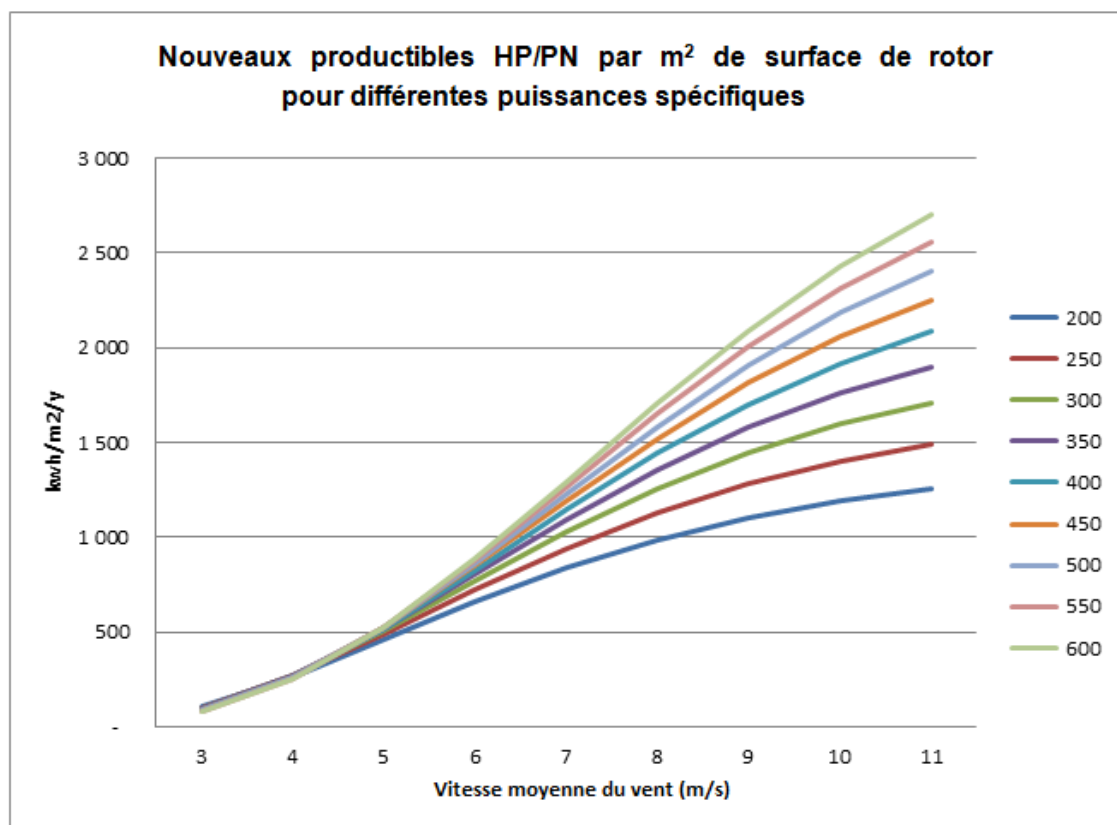


Figure 130

Pour plus d'information consulter *Help Online*.

### 3.5.3 Vérification des productibles à partir des éoliennes existantes

La meilleure méthode de vérification est l'utilisation de données de production fiables issues d'éoliennes en exploitation dans la zone du projet. Si les données de production couvrent des durées courtes (moins de 3 ans), il est important de les corriger pour qu'elles soient représentatives du long terme; au Danemark, en Hollande et en Allemagne, il existe de bons indices d'énergie du vent utilisables pour faire ces corrections. Des commentaires sont présentés à la suite sur des causes d'erreur possibles lors des vérifications.

Pour les pays ne disposant pas de tels indices, vous pouvez construire votre propre indice à partir des productions des éoliennes du voisinage en exploitation depuis plus de 3 ans. Cette durée de 3 ans est seulement valable si on dispose de données à suffisamment long terme pour pouvoir corriger les productions. Les plus récents travaux montrent qu'en Europe du nord 25 années de données ne suffisent pas pour établir un indice fiable et que 50 années seraient nécessaires.

La méthode de vérification consiste à calculer les productibles des éoliennes existantes, en utilisant les mêmes hypothèses et données de départ que pour les nouvelles éoliennes (hormis la description de la topographie qui est spécifique à chaque éolienne), et de comparer les résultats obtenus avec les productions relevées. Si l'écart entre productibles calculés et productions relevées dépasse 5%, il faut en trouver la cause.

Voici des causes possibles d'écarts lorsque les relevés de production sont de courte durée (moins de 3 ans) :

#### 1. La direction du vent

La production d'une éolienne installée sur un emplacement présentant des secteurs avec des rugosités très différentes sera très sensible à la direction des vents dominant sur la période de référence.

#### 2. Les variations saisonnières

La contribution de la période d'été, où les vitesses de vent sont faibles, à la production annuelle d'une éolienne implantée sur une zone barrée de haies et/ou de rugosité élevée sera moindre que celle d'une éolienne placée en zone côtière ou offshore. Par contre la contribution des vents forts de la période d'hiver à la production annuelle sera plus élevée que pour celle implantée en zone côtière ou offshore.

#### 3. Les différences climatiques

Même sur des distances de quelques centaines de kilomètres en terrain simple, il est très commun que le vent géostrophique soit notablement différent.

#### 4. Les courbes de puissance

Le rapport entre le diamètre du rotor de l'éolienne et la puissance nominale de la génératrice est à prendre en compte pour la vérification du productible, de même que le système de contrôle de la puissance (stall ou pitch). Par exemple, aux hautes vitesses de vent, certaines éoliennes ayant des caractéristiques « stall » très prononcées fonctionnent seulement au 2/3 de leur puissance nominale, alors que d'autres fonctionnent à 1/3 au-dessus de leur puissance nominale. Enfin, la vitesse de vent de découplage n'est pas la même pour toutes les éoliennes.

### 3.5.4 Vérification des productibles en utilisant plusieurs sources de données du vent

S'il n'y a pas d'éoliennes dans le voisinage, alors la comparaison des productibles calculés à partir de plusieurs sources de données de vent peut donner une bonne indication de l'incertitude. De manière générale, il ne faut jamais estimer un productible à partir d'un seul jeu de mesures à moins que celui-ci ait été confirmé par d'autres mesures ; le risque de ne pas remarquer des anomalies est simplement trop grand.

EMD a effectué une étude dans laquelle les productions des parcs éoliens ont été comparées aux de productibles calculés. L'étude complète peut être téléchargée sur le site d'EMD ([www.emd.dk](http://www.emd.dk)). Une synthèse est présentée à la suite.

## 3.5.4.0 Synthèse d'études de cas

Case Id	Country	Place	Terrain	Wind farm	Start	Meteorological mast on site	Meteorological mast near site	Measurement height	Wind speed at 40 m on site *)	Goodness, "standard" calculation	Highest goodness	Lowest goodness	NCAR based Goodness
01	DK	Klim Fjordholme	Flat, open, inland, close to fjord	35 x 600 kW Vestas	1996	No	Parallel	10	7.0	1.00	1.02	0.98	-
02	DK	Torrild	Hilly, inland	15 x 150 kW Bonus	1989	Parallel	0	30	6.2	1.05	1.10	1.05	-
03	DK	Torrild, Windsim	Hilly, inland	15 x 150 kW Bonus	1989	Parallel	0	30	6.2	1.15	-	-	-
03	DK	Avedøre (København)	Harbour, close to large city	12 x 300kW Bonus	1993	No	Parallel	0	6.9	1.02	1.02	0.80	0.90
03	DK	Lynetten (København)	Harbour, close to large city	7 x 600kW Bonus	1996	No	Parallel	0	6.4	1.00	1.05	0.70	0.90
03	DK	Dragør (København)	Flat, close to large city and sound	8 x 95 kW Tellus	1989	No	Parallel	0	6.3	0.98	1.00	0.74	0.90
03	DK	Middelgrunden	Offshore, close to large city	20 x 2 MW Bonus	2001	No	Non parallel	50	6.9	0.96	-	-	-
04	DK	Tunø knob	Offshore	10 x Vestas 500 kW	1995	No	No	0	7.8	1.03	1.04	1.00	-
05	DK	Knebel	Hilltop, coastnear, local obstacle	4 x 55 kW Nordtank + 150 kW NTK	1982	No	No	0	7.5	0.98	1.10	0.97	-
06	DK	Brokilde	Coastal open flat land	12 x 600 kW Vestas	1996	No	Parallel	10	7.2	1.05	1.05	0.91	1.15
07	DK	Silstrup	Hilly, inland, close to fjord	3x 225kW Vestas	1990	Parallel	jan-00	10	7.2	0.98	1.02	0.83	-
08	SE	Göteborg	Fjord with skerries, close to open sea	3 x 225 kW Vestas + 6 x 600 kW Vestas	1996	No	No	0	7.0	0.83	1.02	0.83	0.85
09	FIN	Pori	At open sea, flat, skerries	7 x 1 MW Bonus + 300 kW NTK	1999	Parallel	0	38, 62, 87	6.2	1.01	1.20	0.90	0.81
10	DE	Fehmern	At open sea, flat, dikes	Mixed; Bonus, Enercon, HSW, Vestas	1987	Parallel	0	10, 30	7.8	0.93	1.07	0.89	-
11	DE	Knüll	Complex obstacles, medium mountainous	Tacke, Enercon E18 + E40	1993	Parallel	0	10	6.0	0.85	1.24	0.78	-
12	DE	Hartmansheim	Complex obstacles, medium mountainous	Mixed, Bonus, Tacke, Enercon, HSW, Enron	1993	Parallel	0	10, 30	6.0	0.73	0.85	0.70	-
13	NL	Rotterdam	At large fjord, flat, dikes	Mixed	1999	No	No	0	6.5	1.00	1.05	0.89	-
14	FR	Port La Nouvelle	Coast near, hilltop	4 x Vestas V39 (+1 x V25)	1993	No	No	0	7.5	0.90	1.20	0.85	1.99
15	EIRE	Cronalacht	Coast near, hilltop	5 x Vestas V39 600 kW+ 3 x Vestas V47	1997	Non parallel	0	10, 30	9.6	1.00	1.00	0.94	1.04
16	POR	Sines	Coastal, gentle hill, close to city	12 x 500 kW WindWorld	1995	No	No	0	6.0	1.54	1.80	0.59	1.47
17	GR	Sitia, Modi	Flat plateau in complex mountainous region	17 x 600 kW Bonus	1998	Parallel	0	40	9.0	0.97	1.04	0.92	2.60
18	TR	Cesme	Coast near, mountain region	12 x Vestas V44 + 3 x Enercon	1999	No	Parallel	10, 20, 30	7.2	0.92	0.94	0.86	-
19	AUS	Esperance	Coast near, hilly	9 x Vestas V27, 225 kW	1994	Non parallel	0	10, 30	7.5	0.93	1.05	-	1.26
20	USA	Fargo, Minnesota	Flat inland	2 x NEG-Micon 750 kW	1999	Parallel	0	30, 40	6.1	1.08	1.10	0.94	1.00

\*) The expected "real" mean wind speed at site based on all gained experience

Figure 131

Le tableau de la Figure 131, présente une brève description des cas étudiés et la synthèse des résultats.

Définition du « goodness » (facteur de qualité) : c'est le rapport production annuelle mesuré/productible calculé. Si les productions et les mesures de vent ont été faites sur des périodes non concomitantes et dont l'indice d'énergie du vent est différent (Non parallel dans le tableau), le rapport est fait après avoir corrigé soit la production soit les données de vent.

Colonne « standard calculation » :

« Standard calculation » signifie que les calculs ont été faits en utilisant les meilleures données (de notre point de vue) parmi celles disponibles, mais qui ne sont pas forcément celles qui donnent les meilleurs résultats.

Colonnes « highest goodness », « lowest goodness » et « NCAR based goodness » :

Différents calculs et variations des paramètres ont été essayés pour chacun des cas, desquels résultent les valeurs maxi (highest goodness) et mini (lowest goodness) qui donnent un ordre de grandeur de l'incertitude sur les résultats.

Ces valeurs ne sont pas directement comparables. Parfois les valeurs maxi et mini sont dues à des écarts importants entre éoliennes, mais dans la plupart des cas, ces valeurs résultent de l'utilisation de données de vent de sources différentes. La colonne «NCAR based goodness» présente les résultats obtenus en utilisant les données NCAR les plus proches du cas étudié. Les vitesses du vent extraites des données NCAR sont ensuite recalculées à hauteur de moyen en utilisant WASP.



### 3.5.4.1 Exemples de données de vent incertaines et conséquences

Les deux exemples suivants illustrent le niveau d'incertitude pouvant affecter les calculs de productible quand on travaille dans des régions inconnues, qu'il n'y a pas d'éoliennes existantes pour vérifier les calculs et que les données de vent sont de mauvaise qualité.

#### Portugal

Dans ce projet les productibles avaient été calculés à partir des mesures de vent relevées sur le site.

Dans la réalité, la production s'est avérée être la moitié du productible calculé. Les erreurs et les incertitudes suivantes ont été trouvées :

- les vitesses de vent avaient été relevées manuellement à intervalles irréguliers, il n'y avait donc aucune assurance que les mesures soient représentatives de la réalité. Par exemple, les relevés avaient été principalement faits pendant la journée alors qu'il est fréquent que les vitesses du vent soient moindres pendant la nuit.
- Les équipements de mesures n'étaient pas calibrés et placés à 8 mètres de hauteur seulement.
- Les mesures avaient été faites sur le sommet d'une colline càd des conditions rendant l'extrapolation des vitesses à hauteur de moyeu très incertaine.
- L'utilisation des données de la station météo la plus proche du site aurait donné des résultats bien meilleurs. Mais cette station ne fut pas retenue car située dans une topographie complexe entre l'océan et la ville.

#### Irlande

Pour ce projet on disposait des mesures de vent effectuées sur site, fournies par le client, et des données de 3 stations de l'Atlas Eolien Européen situées dans un rayon d'environ 70 km autour du site.

Les résultats obtenus à partir de ces 4 sources de données sont présentés dans le tableau suivant :

Données de départ	Productible relatif
Station 1	100%
Station 2	92%
Station 3	56%
Mesure du vent, Site	163%

Il ya presque un facteur 3 entre les productibles extrêmes. Cela montre qu'il ne faut jamais se fier à un seul jeu de données sauf si celui est très bien documenté.

### 3.5.4.2 Vérification à l'aide d'atlas éoliens

Si vous disposez d'un grand nombre de statistiques éoliennes couvrant une grande étendue (région ou pays), vous pouvez, à partir de ces statistiques calculer les productibles dans des conditions identiques (même éolienne et en considérant que le terrain est plat avec une rugosité de classe = 1 dans toutes les directions) et reporter les résultats sur la carte (en % par exemple). En joignant tous les points de valeur identique ou proche, vous obtiendrez des courbes d'iso-productibles. En général, le vent géostrophique, que les statistiques éoliennes sont censées représenter, varie progressivement et on doit, par conséquent, obtenir des courbes aux formes « arrondies ». Cet exercice révélera souvent des statistiques éoliennes incorrectes.

La Figure 132 illustre le résultat de ce travail effectué sur une partie de la Suède. De plus, pour la partie Danoise les productions des éoliennes existantes ont également été utilisées.

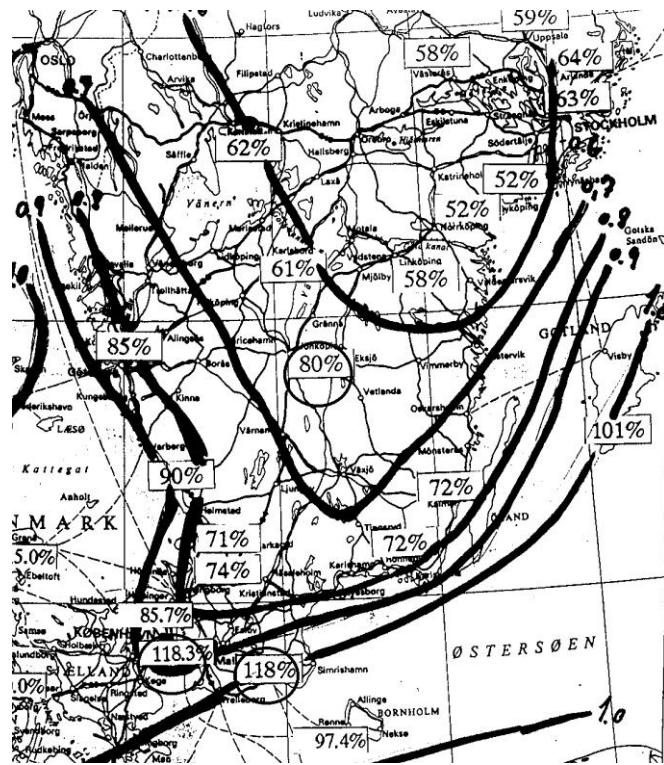


Figure 132

## 3.6 Cartes de ressources éoliennes

### 3.6.0 Introduction

Une carte de ressources éoliennes est un outil qui peut avoir de nombreuses utilisations telles que :

- La recherche des zones favorables à l'exploitation de l'énergie éolienne lors des phases de prospection,
- L'estimation du potentiel éolien d'une zone, d'une région ou même d'un pays,
- L'aide à l'implantation des éoliennes d'un parc éolien en identifiant les meilleurs sites (l'implantation optimale peut être calculée automatiquement avec le module OPTIMISATION, voir section 8).

Une carte permettant l'identification des meilleures zones peut être réalisée aussi bien pour des étendues de très grandes dimensions que pour des surfaces très petites.

WindPRO permet de réaliser des cartes couvrant des surfaces très étendues en une seule opération. En effet, le programme peut utiliser un nombre illimité de fichiers .map (rugosité et orographie) et travailler avec plusieurs statistiques éolienne ; les transitions se font automatiquement en appliquant des pondérations inversement proportionnelles aux distances séparant les statistiques de la position du calcul. WindPRO utilise WASP comme moteur de calcul.

Il est également possible, le cas échéant, de générer une carte dont les ressources ont été corrigées par l'emploi du RIX.

### 3.6.1 Données nécessaires au calcul d'une carte de ressources éoliennes

Les données suivantes sont nécessaires pour générer une carte de ressources éoliennes :

- les données de rugosité numérisées couvrant la surface de la carte de ressources à réaliser plus une bande périphérique de 10-20 km de largeur,
- les courbes de niveau numérisées couvrant la surface de la carte de ressources à réaliser plus une bande périphérique de 5-10 km de largeur selon la complexité du terrain,
- une ou plusieurs statistiques éoliennes valables pour la zone considérée, auxquelles on peut appliquer automatiquement une pondération inversement proportionnelle à la distance les séparant du point de calcul,
- optionnellement, la description des obstacles ; en général ils ne sont pas pris en compte lors des calculs de cartes de ressources mais cela est possible avec WindPRO.

#### 3.6.1.0 Rugosités

Il y a deux manières de numériser les rugosités :

##### Numérisation manuelle

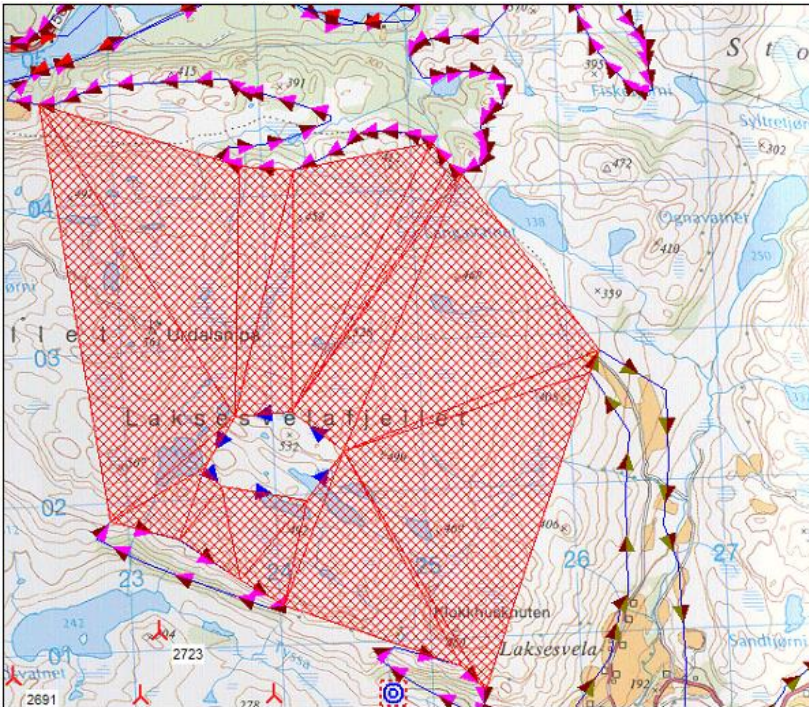
Cette opération est la combinaison d'un travail sur carte complété par une vérification sur site suivie par la numérisation avec WindPRO.

WindPRO permet de numériser directement en lignes de rugosité en utilisant un objet *Données-lignes* ou indirectement en utilisant un objet *Données-surfaces* puis en convertissant le résultat en lignes de rugosité. Il est vivement recommandé d'utiliser un objet *Données-surfaces* car il évite les lignes de rugosité qui se coupent ou qui ne sont pas fermées qui peuvent induire de grosses erreurs lors des calculs WASP.

##### Importation des données

Il est possible de générer des cartes de rugosité en important des informations sur l'occupation des sols à partir de bases de données ou de SIGs. A cet effet, un objet *Données-surfaces* doit être utilisé. EMD a réalisé avec WindPRO une carte détaillée des rugosités du Danemark qui a servi à générer la carte des ressources éoliennes du pays. Pour ce travail EMD a utilisé des moyens plus sophistiqués que ceux présentés ici. Pour plus d'information sur le sujet, n'hésitez pas à nous contacter.

Depuis la version 2.5 de WindPRO, il est possible d'utiliser l'objet *Données-lignes* pour détecter les lignes de rugosité incohérentes. Les incohérences sont indiquées par des points et des zones colorés en rouge. Un exemple est présenté à la Figure 133.



Dans cet exemple, la ligne au centre est incohérente avec les lignes voisines ; l'incohérence est mise en évidence par les surfaces quadrillées en rouge.

Figure 133

### 3.6.1.1 Données altimétriques

Les données d'altitude numérisées peuvent être achetées et importées, elles peuvent aussi être téléchargées gratuitement dans un objet *Données-lignes* ou *Maille-altimétrique* en utilisant le service *Données-Online* d'EMD ou numérisées manuellement (voir la section 2 BASIS).

### 3.6.1.2 Statistiques éoliennes

Pour les informations relatives aux statistiques éoliennes reportez-vous aux 3.2.1.1 et 3.2.4. Un grand avantage du module RESSOURCE est sa capacité à gérer automatiquement et de manière continue plusieurs statistiques éoliennes en appliquant des pondérations inversement proportionnelles aux distances les séparant de la position du point de calcul.

### 3.6.1.3 Obstacles

Des obstacles peuvent être également introduits en utilisant des objets *Obstacles*, comme indiqué au 3.2.1.5. L'introduction d'un obstacle augmente à lui tout seul de façon perceptible la durée du calcul pour la raison suivante : en présence d'un obstacle WindPRO lance un calcul WASP « normal » alors qu'en l'absence d'obstacle WindPRO lance un calcul WASP « ressources » qui est beaucoup plus rapide.



### 3.6.2 Entrée des données pour les calculs avec RESSOURCE

Tout d'abord il faut créer un objet *Données-site* dont l'usage est *Calculs de cartes de ressources...*, voir Figure 134, qui servira à faire le lien entre la description du terrain (rugosité, orographie, obstacles) et WAsP. Sa position sur la carte est sans importance.

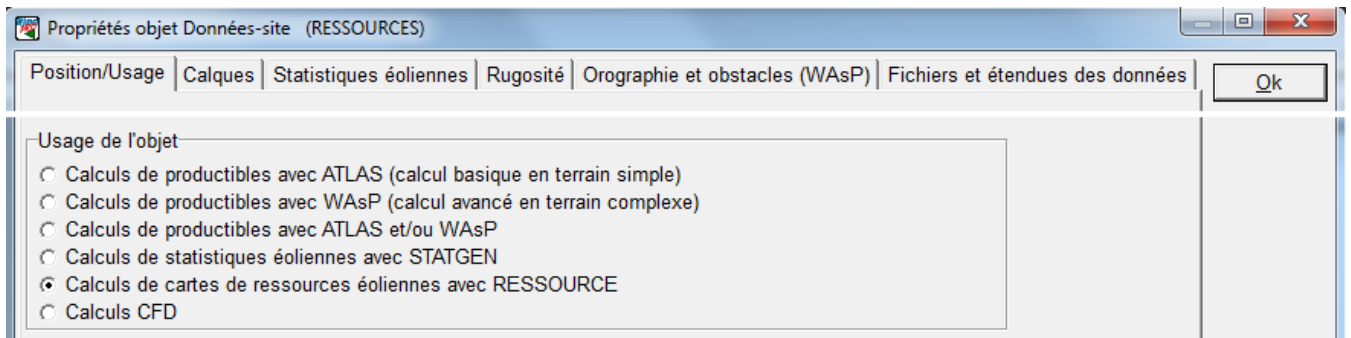


Figure 134

Si on utilise plusieurs statistiques éoliennes, il faut indiquer, dans l'onglet *Statistiques éoliennes*, comment se fait la pondération entre les différentes statistiques, voir Figure 135.

En cochant l'option *Actualiser distance et pondération quand on déplace l'objet et lors des calculs RESSOURCE*, la pondération se fait automatiquement en fonction des distances séparant le point de calcul des statistiques ; la pondération est inversement proportionnelle à la distance, et il est possible de *Limiter le poids max des statistiques*, cela évite des petits minimums ou maximums localisés juste autour de la statistique.

Si l'option antérieure n'est pas cochée, la pondération ne change pas en fonction du point de calcul, on doit l'ajuster manuellement en jouant sur les champs *Distance* ou *Pondération*.

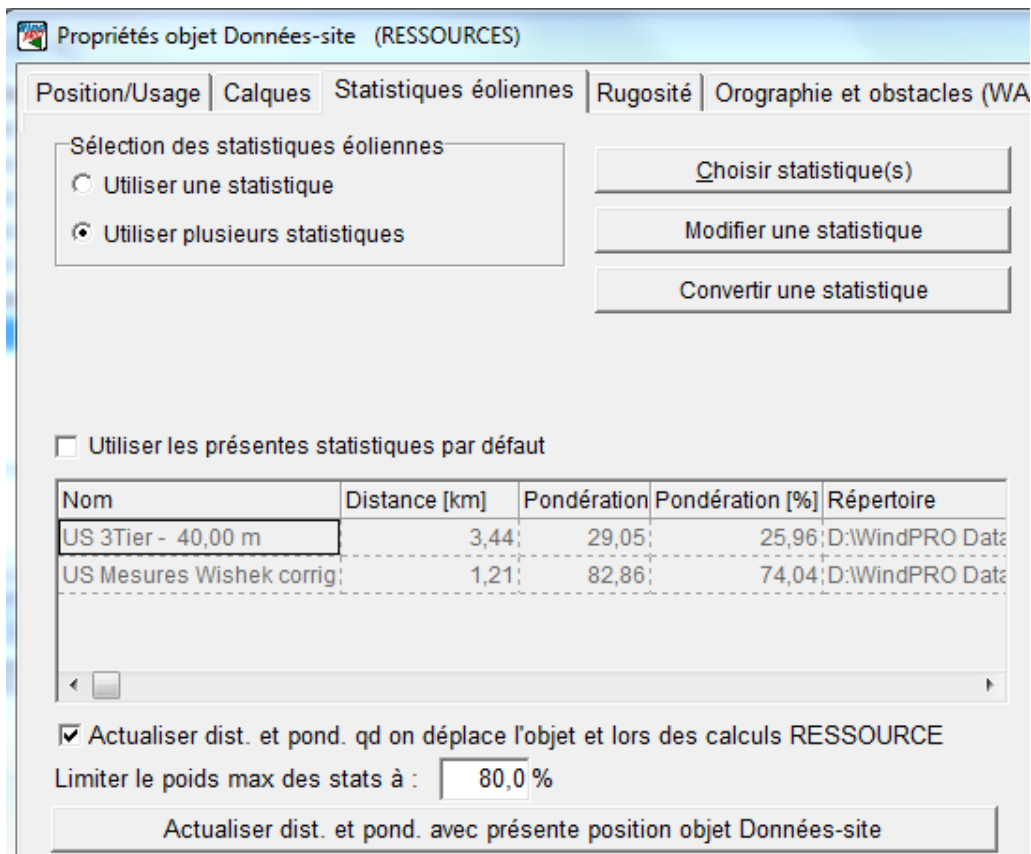


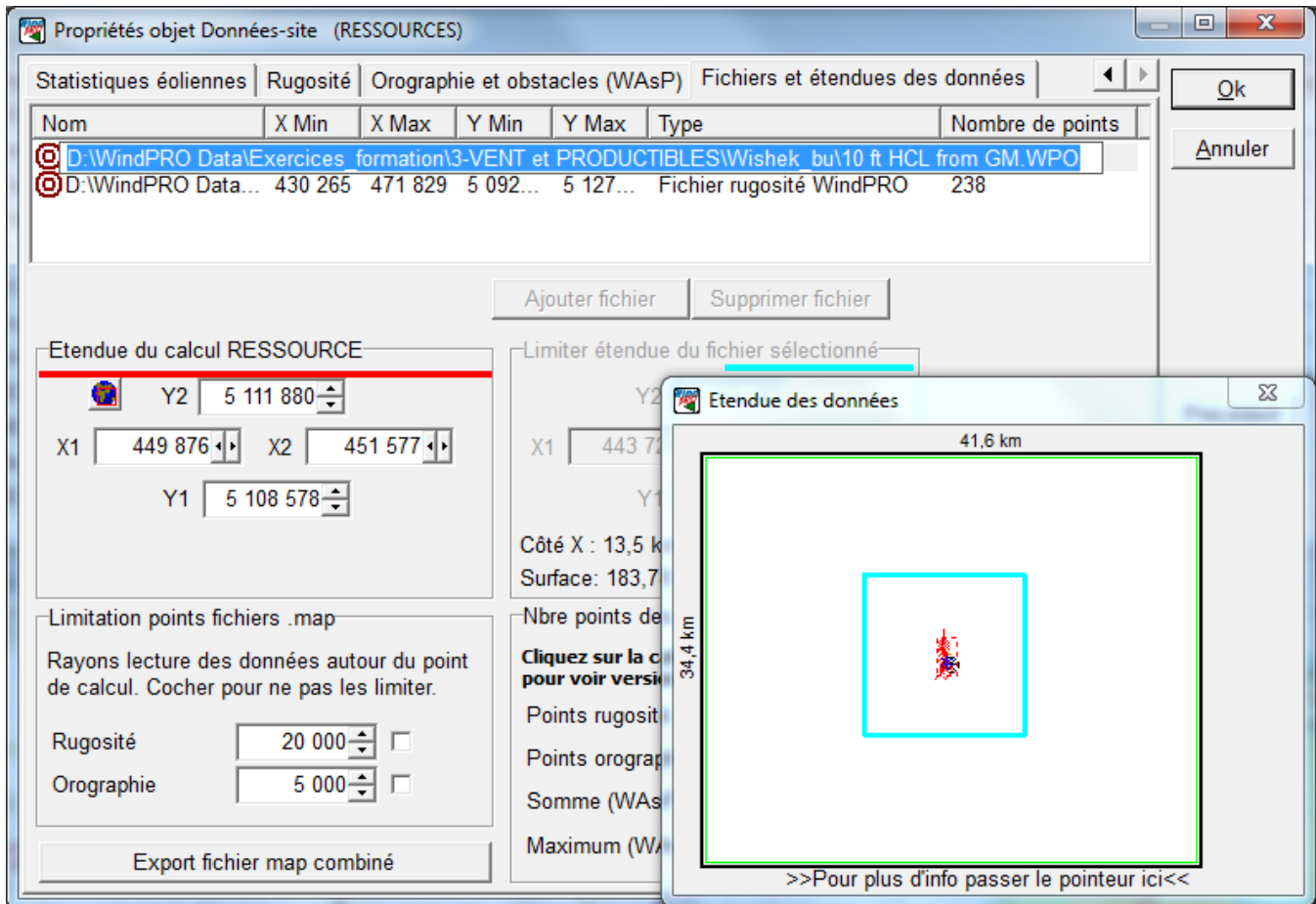
Figure 135



Ensuite, après avoir indiqué les données à utiliser dans les onglets, *Rugosité*, *Orographie et obstacles (WAsP)*, il faut délimiter l'étendue de la carte des ressources à calculer dans l'onglet *Fichiers et étendues des données*, voir la Figure 136.

A cet effet, cliquez sur le bouton présenté ci-contre pour faire la délimitation directement sur le fond de carte à l'écran. Alternativement, la délimitation peut se faire en entrant les coordonnées des côtés de la carte X1, X2, Y1, Y2.

NOTE : à place de la délimitation rectangulaire définie ici, on pourra utiliser la surface délimitée par l'objet *Aire-parc* pour limiter la carte des ressources à la zone du parc uniquement. Le choix se fait dans la fenêtre de paramétrage du calcul.



Distances entre les données les plus périphériques et les bords de la surface délimitant l'étendue du calcul:

	Orographie	Rugosité	Distances recommandées:
Nord	5,3 km	15,3 km	Orographie : 5,0 km (recommandée: 7,0 km)
Est	5,7 km	20,3 km	Rugosité : 20,0 km (recommandée: 20,0 km)
Sud	5,0 km	15,9 km	Valeurs en rouge -> distances insuffisantes
Ouest	6,2 km	19,6 km	



NOTE: ces distances ont été établies à partir des points les plus périphériques sans aucune analyse du terrain entre ces points. S'il y a une montagne à 8 km du site, ou s'il y a un changement de rugosité terre-mer à 21 km, les distances recommandées pourraient être insuffisantes. Par contre, en terrain très simple des distances moindres sont suffisantes. Notez aussi que ces distances sont pertinentes pour des hauteurs de moyeu allant jusqu'à 100m environ, pour des hauteurs plus élevées des distances supérieures sont recommandées.

Figure 136

Dans cet onglet, un autre paramétrage important est celui des *Rayons de lecture des données autour du point de calcul*. En limitant ces rayons et en calculant la carte par dalles (de 1 x 1 km), des cartes de ressources sans limite d'étendue peuvent être calculées. Le calcul peut être partagé entre les processeurs d'une même machine et aussi entre plusieurs machines en réseau.

La limitation des rayons évite d'envoyer à WAsP trop de données terrain (fichier .map) pour le calcul de chaque dalle. Néanmoins si la description des rugosités et de l'orographie est très détaillée (lignes formées de beaucoup de points) on peut être amené à réduire le rayon pour ne pas dépasser les capacités de WAsP. Pour avoir une estimation du nombre de points envoyés à WAsP changez l'*Usage de l'objet* par *Calculs de productibles avec WAsP*, les explications correspondantes sont données au 3.3.1.5.

### 3.6.3 Réalisation d'une carte de ressources éoliennes

  **MODELE RESSOURCE** (cartographie de la ressource éolienne)

Le calcul se lance en cliquant sur la flèche verte. La fenêtre paramétrage du calcul s'ouvre, voir Figure 137.

#### Onglet *Principal*

Plusieurs possibilités sont proposées pour générer la carte des ressources :

- en utilisant WAsP
- à partir de fichier(s)-résultat(s) WAsP-CFD, alors l'option *RIX* disparaît.
- à partir de fichier(s) .RSF ou .WRG provenant par exemple d'un autre CFD.

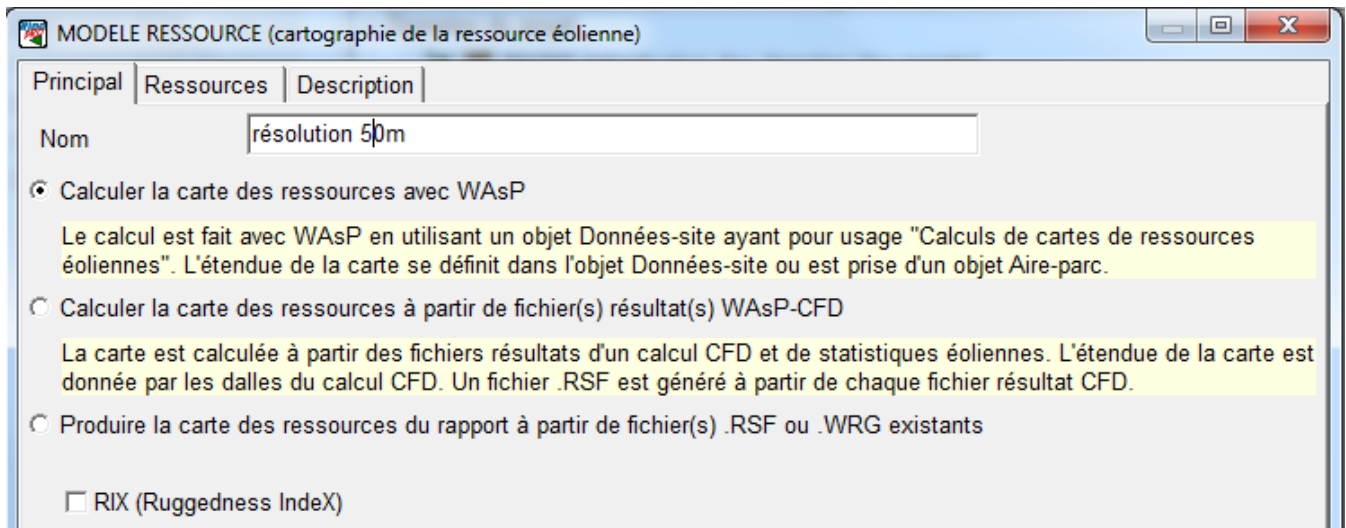


Figure 137

#### Onglet *Ressources*

Dans cet onglet, voir Figure 138, on peut choisir les hauteurs (cinq au maximum) et la résolution du calcul des ressources.

Si l'option *N'utiliser que la surface de l'objet Aire-parc* est cochée alors l'étendue de la carte calculée n'est plus délimitée par le rectangle défini dans l'objet *Données-site* mais par la surface de l'objet *Aire-parc* qui peut avoir une forme polygonale quelconque. Cette option présente les deux avantages suivants:

- 1) la réduction du temps de calcul car seules les zones utiles sont prises en compte,
- 2) de nouvelles possibilités de présentation des cartes. Par exemple, la représentation des ressources éoliennes peut suivre exactement le contour du territoire d'une commune.

Si l'option *Calque-résultat* est cochée, alors, à la fin du calcul, WindPRO crée un objet *Calque-résultat* qui permet de visualiser les ressources superposées au fond de carte à l'écran. Si cette option n'a pas été cochée, pour visualiser le résultat il faut afficher le rapport.

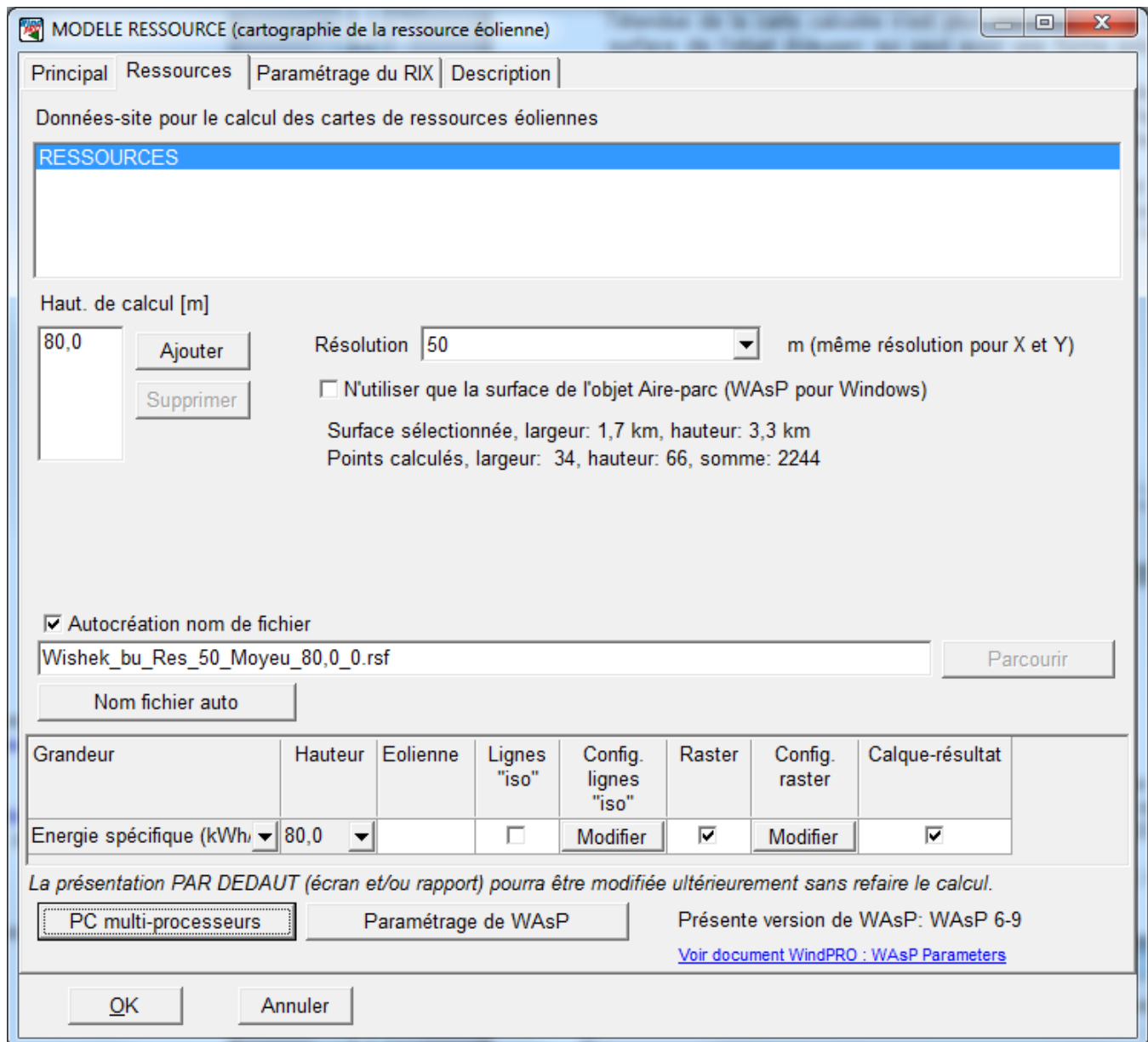


Figure 138

### Onglet Paramétrage du RIX

Voir Figure 139.

Dans cet onglet se fait le paramétrage du RIX, voir détails au paragraphe 3.4.0.2 *Calcul du RIX*.

Les valeurs *RIX* et *Delta RIX* peut être visualisés à l'écran sous forme de *Calques-résultats* en cochant les options correspondantes.

MODELE RESSOURCE (cartographie de la ressource éolienne)

Principal | Ressources | Paramétrage du RIX | Description

Autocréation nom de fichier

Wishek\_bu\_RixCorrRes\_50\_Moyeu\_50,0\_67,0\_80,0\_0.rsf Parcourir

Nom fichier auto

**Données du calcul**

Rayon de calcul: 3 500 m

Seuil de pente min.: 21,8 degrés

40,0 %

Pondération = f(direction)

**Formule utilisée pour la correction**

$U_{\text{corrigée}} = U_{\text{calculée}} / \text{Exp}(\alpha \times \text{Delta-RIX})$

Alpha: 0,0 (0,7 < alpha recommandée < 1,5 en fonction du site)

Pas de correction ds l'intervalle: 0,0 % - 0,0 % Si globalement le |Delta-RIX| du site < 5%, on recommande de ne pas appliquer de correction. Pour appliquer tout de même une correction, modifiez l'intervalle.

Calculs	Lignes "iso"	Config. lignes	Raster	Config. raster	Calque-résultat
RIX	<input type="checkbox"/>	Modifier	<input checked="" type="checkbox"/>	Modifier	<input checked="" type="checkbox"/>
Delta RIX	<input type="checkbox"/>	Modifier	<input type="checkbox"/>	Modifier	<input checked="" type="checkbox"/>

*Note: ce paramétrage par défaut du rapport peut être modifié lors de son impression.*

Pour les fichiers ressources corrigées RIX

*Note: les paramètres des cartes ressources standard et corrigées RIX sont identiques*

OK Annuler

Figure 139

### 3.6.3.0 PC multi-processeurs

Les calculs des cartes de ressources éoliennes peuvent être très longs. Quand on dispose de machines multi-processeurs ou de plusieurs machines en réseau, cette option permet le paramétrage de l'utilisation des ressources machine disponibles pour que le calcul avec RESOURCE soit le plus rapide possible.

En cliquant sur le bouton *PC multi-processeurs* de l'onglet *Ressources*, la fenêtre de la Figure 140 s'ouvre où des explications sont données dans la cadre jaune.

#### NOTES :

Chaque PC utilisé pour le calcul devra avoir une licence WASP, par contre l'installation de WindPRO n'est pas requise, il faut seulement l'application WASPResCalc.

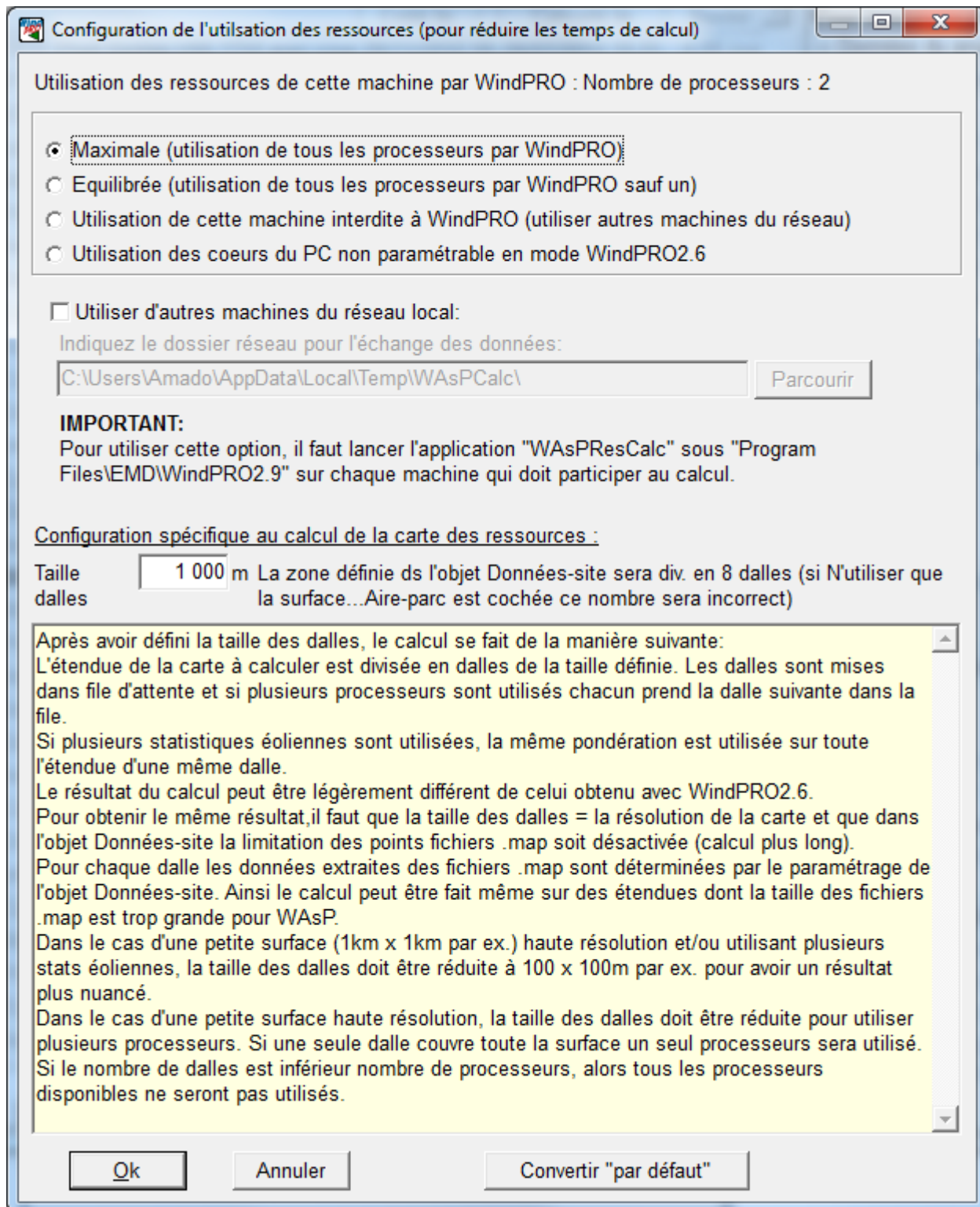


Figure 140



### 3.6.4 Affichage et impression d'une carte de ressources éoliennes

Le calcul MODELE RESSOURCE génère un rapport. La visualisation et l'impression des cartes se fait à partir *Options de présentation*, voir Figure 141.

On peut choisir la grandeur à représenter et personnaliser la légende en cliquant sur les boutons à gauche des options *Raster* et *Lignes* (voir mise en œuvre de la personnalisation dans la section 2, BASIS)

Notez que les productibles ne sont corrigés en fonction de la densité de l'air.

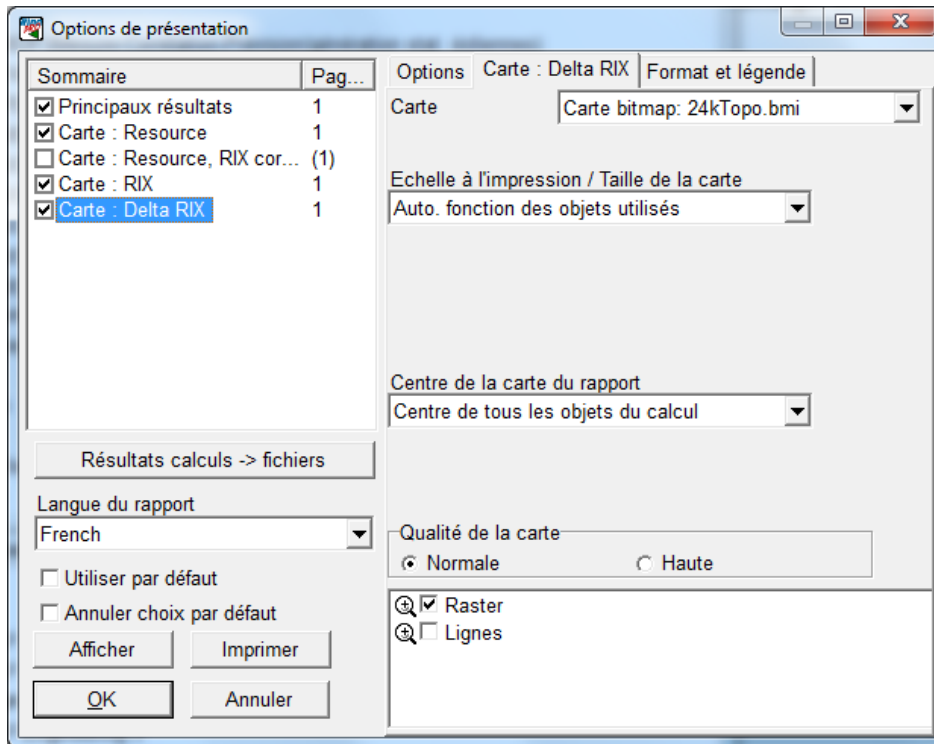
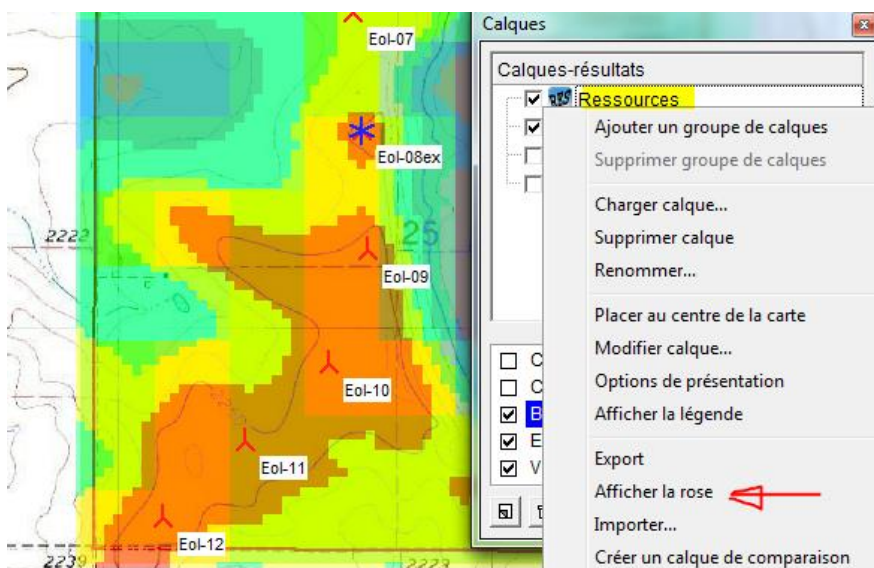


Figure 141

### 3.6.5 Affichage des roses des ressources sur la carte

Quand une carte des ressources éoliennes est disponible, on peut afficher le niveau des ressources sous forme de rose à l'emplacement du pointeur de la souris.

La procédure à suivre pour afficher la rose est la suivante :



Faites un clic-droit sur le *Calque-résultat*, et choisissez la commande *Afficher la rose*, voir Figure 142.

Figure 142

Dans la fenêtre *Grandeur à présenter*, cocher les grandeurs à visualiser sous forme de rose, on peut alterner d'une grandeur à l'autre en cochant *Afficher à l'emplacement du pointeur de la souris*, voir Figure 143.

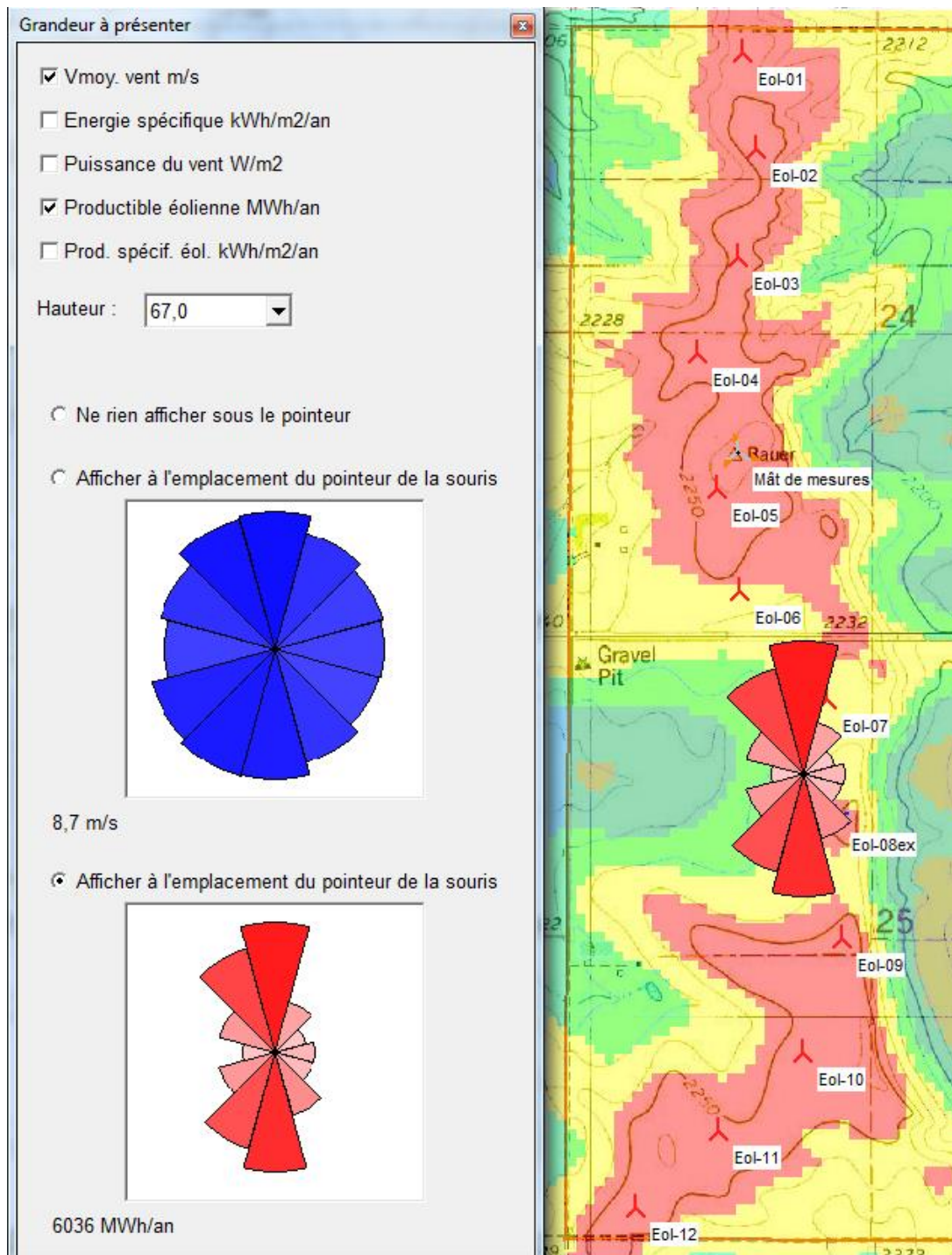


Figure 143

Dans l'exemple présenté à la Figure 143 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, on a choisi de présenter la rose des productibles à 67m de hauteur basé sur un modèle d'éolienne choisi dans la bibliothèque.

Sous les roses de la fenêtre *Grandeur à présenter* est indiquée la valeur à l'emplacement du pointeur de la souris. L'affichage de la rose des ressources est un moyen pratique d'examiner comment varient les ressources dans la zone du site étudié.

### 3.6.5.0 Affichage des roses aux emplacements des objets Données-site

L'affichage des roses des énergies du vent à l'emplacement des objets *Données-site* est une variante de l'affichage des roses sur la carte des ressources.

Mais dans ce cas la rose est calculée à partir des informations contenues dans l'objet.

Pour afficher les roses, sélectionnez un objet *Données-site*, appelez le menu contextuel par un clic droit et cliquez sur *Afficher la rose des énergies*, voir Figure 144.

Si plusieurs mâts de mesures sont installés sur le site, on peut créer à leur emplacement des roses, basées sur des périodes de mesure communes, vérifier visuellement s'il y a concordance ou incohérence et identifier ainsi d'éventuelles anomalies.

Si les objets sont déplacés ou si des objets sont ajoutés, il est nécessaire de rafraîchir les roses en répétant *Afficher la rose des énergies* dans le menu contextuel.

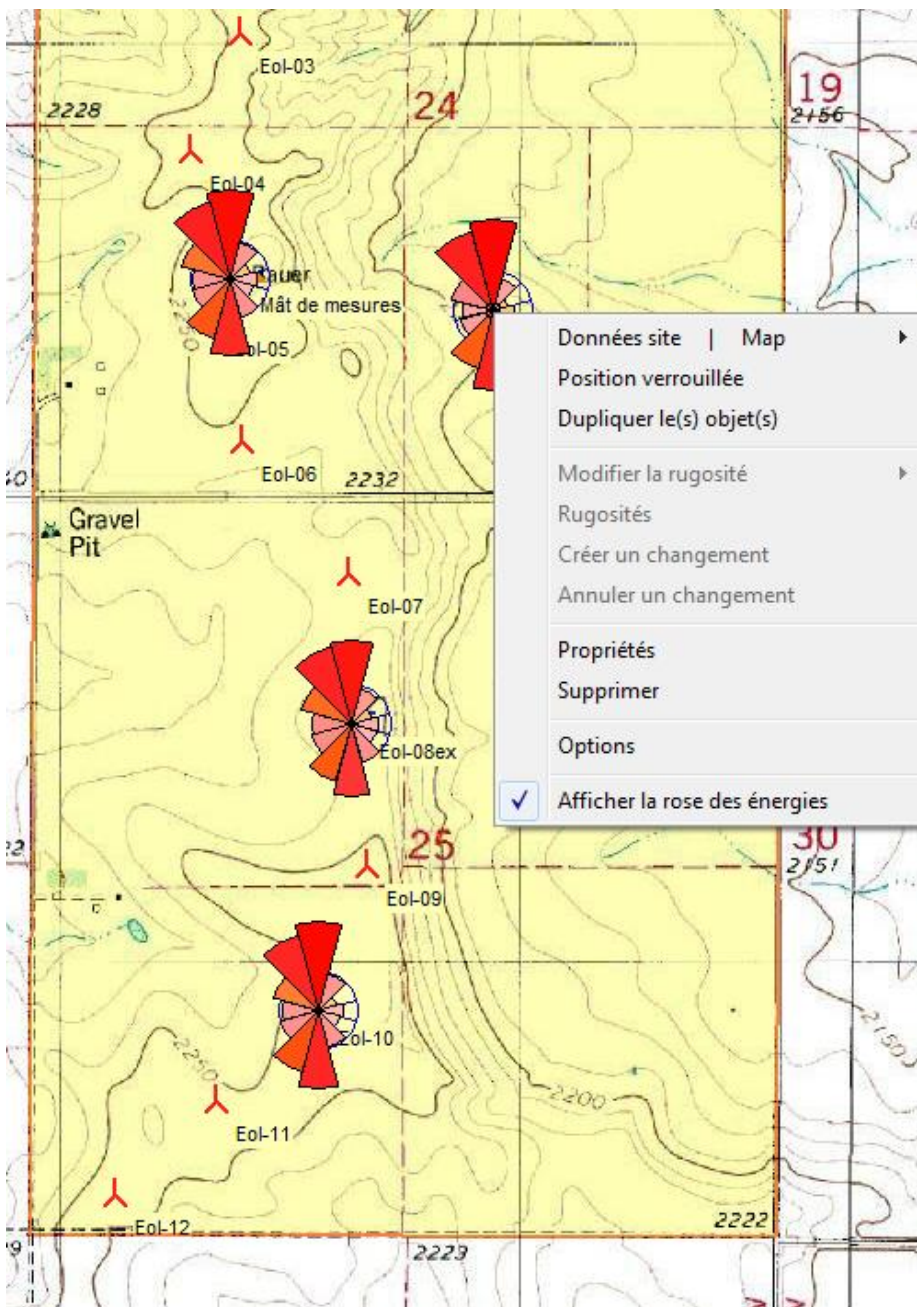


Figure 144

