

# 13. QUALIFICATION des SITES

<b>13.0 Introduction, définitions et guide .....</b>	<b>637</b>
13.0.0 L'« IEC 61400-1 ed.3 (2010) standard » .....	637
13.0.1 Contextes typiques d'utilisation .....	638
13.0.2 Guide des étapes à suivre .....	638
<b>13.1 Préparation préalable .....</b>	<b>640</b>
13.1.0 Onglet Principal .....	640
13.1.1 Onglet Données de vent .....	641
13.1.2 Onglet Eoliennes .....	642
13.1.3 Onglet Mesures site – Eoliennes .....	643
13.1.4 Onglet Correction long terme .....	644
13.1.5 Onglet WASP .....	645
13.1.6 Onglet WEng .....	646
13.1.6.0 Paramétrage Avancé .....	647
<b>13.2 Contrôles principaux .....</b>	<b>648</b>
13.2.0 Complexité du terrain .....	649
13.2.0.0 Description du contrôle et effets de la complexité .....	649
13.2.0.1 Paramétrage, calculs et résultats .....	649
13.2.0.2 Méthodologie IEC d'analyse de la complexité du terrain .....	651
13.2.1 Vitesses extrêmes du vent .....	653
13.2.1.0 Description et limites du contrôle .....	653
13.2.1.1 Calculs et résultats .....	653
13.2.1.2 Paramétrage du modèle statistique .....	656
13.2.1.3 Modèle d'extrapolation à hauteur de moyeu des vitesses extrêmes du vent .....	658
13.2.1.4 Utilisation de paramètres supplémentaires .....	658
13.2.2 Turbulences effectives .....	660
13.2.2.0 Description et limites du contrôle .....	660
13.2.2.1 Calculs et résultats .....	660
13.2.2.2 Paramétrage du calcul de la turbulence naturelle .....	666
13.2.2.3 Modèle d'extrapolation de la turbulence à hauteur de moyeu .....	668
13.2.2.4 Correction de la structure de la turbulence .....	669
13.2.2.5 Modèle Frandsen .....	670
13.2.2.6 Gestion sectorielle .....	671
13.2.3 Distributions des vitesses du vent .....	672
13.2.3.0 Description et limites du contrôle .....	672
13.2.3.1 Calculs et résultats .....	672
13.2.3.2 Paramétrages du calcul .....	674
13.2.4 Angles des écoulements .....	675
13.2.4.0 Description et limites du contrôle .....	675
13.2.4.1 Calculs et résultats .....	675
13.2.4.2 Paramétrages du calcul .....	677
13.2.5 Cisaillements .....	678
13.2.5.0 Description et limites du contrôle .....	678
13.2.5.1 Calculs et résultats .....	678
13.2.5.2 Paramétrages du calcul .....	680
13.2.6 Densités de l'air .....	681
13.2.6.0 Description et limites du contrôle .....	681
13.2.6.1 Calculs et résultats .....	682
13.2.6.2 Paramétrages du calcul .....	684
<b>13.3 Contrôles additionnels .....</b>	<b>685</b>
13.3.0 Aléa sismique .....	686
13.3.0.0 Description et limites du contrôle .....	686
13.3.0.1 Paramétrage, calculs et résultats .....	687
13.3.1 Températures de fonctionnement .....	689
13.3.1.0 Description et limites du contrôle .....	689
13.3.1.1 Calculs et résultats .....	689

13.3.1.2 Paramétrages du calcul .....	691
13.3.2 Densité de foudroisement.....	693
13.3.2.0 Description et limites du contrôle.....	693
13.3.2.1 Paramétrage, calculs et résultats .....	693
<b>13.4 Tout (re)calculer .....</b>	<b>695</b>
<b>13.5 Exportation des résultats .....</b>	<b>696</b>
<b>13.6 Rapports .....</b>	<b>697</b>
13.6.0 Principaux résultats .....	697
13.6.1 Résultats par éolienne .....	698
13.6.2 Détail des hypothèses .....	699
13.6.3 Résultats détaillés des contrôles .....	700
<b>13.7 Bibliographie .....</b>	<b>702</b>
<b>13.8 Annexe-1 - Gumbel's Theory of Extremes and more .....</b>	<b>703</b>
<b>13.9 Annexe-2 - Frandsen Effective turbulence model .....</b>	<b>708</b>
<b>13.10 Annexe-3 - Critères déterminant les qualifications Ok, Attention et Critique....</b>	<b>711</b>

# 13. QUALIFICATION des SITES

## 13.0 Introduction, définitions et guide

Le choix des machines les mieux adaptées au site et à la disposition d'un parc est une étape importante de l'étude d'un projet éolien. Les éoliennes sont conçues pour durer 20 ans dans les conditions climatiques spécifiées par l'IEC. L'IEC a défini plusieurs classes climatiques désignées par la combinaison d'un chiffre romain et d'une lettre, par exemple IA ou IIIC, où le chiffre indique la classe de vent et la lettre la classe de turbulence. Les éoliennes de classe IA (c'est-à-dire celles conçues pour être utilisées dans les conditions de la classe climatique IA) sont les plus robustes et les éoliennes la classe IIIC sont les moins robustes.

L'installation d'une éolienne inadaptée peut aboutir à une défaillance prématurée de la structure dont les conséquences peuvent être ruineuses. Le choix d'une éolienne de classe supérieure aux besoins, dont le coût est plus élevé, peut mettre en danger la viabilité d'un projet.

Le module *QUALIFICATION des SITES* de WindPRO aide à déterminer la classe des machines la mieux adaptée aux conditions du projet. A cet effet, le module effectue les contrôles définis par l'IEC et met en lumière ceux dont le résultat est *Critique*.

Les normes de conception auxquelles doivent satisfaire les éoliennes sont données dans le document de l'IEC suivant :

IEC 61400-1 ed. 3 (2010) "Wind turbines Part 1 - Design requirements" [1, 2]

Dans ce document, la section 11 « Assessment of a wind turbine for site-specific conditions » décrit la procédure à suivre pour qualifier les conditions particulières d'un site qui à leur tour permettent de déterminer la classe de machine à utiliser. Le module *QUALIFICATION des SITES* met en œuvre cette procédure.

### 13.0.0 L'« IEC 61400-1 ed.3 (2010) standard »

Le tableau 1 de l'IEC 61400-1 ed. 3, voir

*Figure 1*

, donne les paramètres de base des classes standards.

Classe de machine	I	II	III	S
<b>V</b> ref [m/s]	50,0	42,5	37,5	Valeurs spécifiques définies par le concepteur
<b>A</b> Iref [-]	0,16			
<b>B</b> Iref [-]	0,14			
<b>C</b> Iref [-]	0,12			

*Figure 1*

La section 11 de l'« IEC 61400-1 ed. 3 (2010) standard » (désignée par « norme IEC » dans la suite) décrit sept contrôles principaux utilisés pour la qualification des sites. Le premier de la liste se rapporte au relief et les six autres à la climatologie :

- Complexité du terrain
- Vitesse extrême du vent
- Turbulence effective
- Distribution des vitesses du vent
- Cisaillement
- Angle de l'écoulement
- Densité de l'air

A cette liste s'ajoutent des contrôles environnementaux additionnels qui doivent également pris en compte pour la qualification des sites. Dans cette liste, nous avons sélectionné les trois contrôles les plus importants pour le choix des machines :

- Aléa sismique
- Densité de foudroiement
- Températures extrêmes

Les autres contrôles de cette liste - Gel, grêle et neige ; humidité ; salinité ; irradiation solaire ; substances chimiques agressives - n'ont pas été intégrées dans cette première version du module.

### 13.0.1 Contextes typiques d'utilisation

La mise en œuvre du module *QUALIFICATION des SITES* peut se faire à partir des trois contextes de départ suivants:

- 1) *Mesures (du vent sur site) et modèles d'écoulement.*
- 2) *Mesures (du vent sur) site uniquement.*
- 3) *Pas de mesures (du vent sur) site.*

Le contexte 1) permet de mettre en œuvre toutes les possibilités du module. Il requiert des mesures du vent faites sur le site du projet à plusieurs hauteurs et les logiciels WAsP (<http://www.wasp.dk/Products/WAsP.aspx>) et WAsP Engineering (<http://www.wasp.dk/Products/WEng.aspx>). L'utilisation du module se fera habituellement avec WAsP. WAsP Engineering n'est pas indispensable, mais il permet de faire des calculs complémentaires qui améliorent la qualité des résultats.

Le contexte 2) représente le minimum nécessaire pour mettre en œuvre le module. Il requiert des mesures du vent faites sur le site du projet à plusieurs hauteurs mais ne nécessite aucun logiciel supplémentaire.

Le contexte 3) ne fait pas appel à des mesures du vent faites sur site, mais requiert des statistiques éoliennes (fichiers .lib) représentatives de la climatologie du site, c'est le contexte habituel au Danemark ou en Allemagne où l'exploitation de l'énergie éolienne est très développée. Il faut également disposer des logiciels WAsP et WAsP Engineering (WEng 3.0).

Dans les contextes 1) et 3), quand on choisit WAsP, il faut indiquer si on va utiliser des *Statistiques éoliennes corrigées long terme* ou des *Mesures site*.

Le premier choix signifie qu'on dispose déjà de statistiques éoliennes représentatives du long terme générées à partir de mesures sur site corrigées avec MCP. Ce choix garantit une parfaite cohérence avec les calculs PARK s'ils ont été faits à partir de ces mêmes statistiques.

Le second choix va conduire à un calcul STATGEN qui va générer une statistique éolienne (ou plusieurs s'il y a plusieurs mâts) à partir des mesures. Avant de produire la statistique éolienne, une correction pour rendre les mesures représentatives du long pourra être faite sans quitter le module. Notez que la « norme IEC » préconise d'utiliser des données représentatives du long terme.

### 13.0.2 Guide des étapes à suivre

- Indiquez votre contexte :
  - 1) *Mesures et modèles d'écoulement.*
  - 2) *Mesures site uniquement.*
  - 3) *Pas de mesures site.*
- Contexte 1) : *Mesures et modèles d'écoulement*
  - Choisissez les *Modèles d'écoulement*.
  - Indiquez si on utilisera WAsP avec : *Stat. Eolienne(s) corrigée(s) long terme* ou des *Mesures site*.
  - *Forcez la classe des éoliennes* si elle n'est pas indiquée dans les *Propriétés* des objets éoliennes.
  - Indiquez les *Mesures site* à utiliser, précisez la *Hauteur principale* et les *Hauteurs pour le calcul du cisaillement*.
  - Indiquez les *Données long terme* à utiliser (si disponibles).
  - Indiquez l'implantation des éoliennes à utiliser, si votre projet en contient plusieurs.
  - S'il y a plusieurs mâts de mesures, indiquez les *Associations éoliennes-mesures site*.
  - Si on utilise WAsP avec des *Mesures site*, lancez la *Correction long terme* des mesures.
  - Faites le *Choix de(s) objet(s) Données-site* que WAsP devra utiliser et *Lancez le calcul WAsP*.
  - Faites le *Choix de l'objet Données-site* que WEng devra utiliser et *Lancez le calcul WEng*.
  - Dans les *Contrôles*, sélectionnez les *Contrôles principaux* et les *Contrôles additionnels* à effectuer.
  - *Lancez les Contrôles*, modifier si nécessaire le paramétrage avant de *Calculer*.
  - Examinez les résultats des *Contrôles*.

- Lancez la génération du rapport, notez que certains résultats peuvent être exportés en format texte en utilisant la commande *Résultats calculs* -> *fichiers*.
- Contexte 2) : *Mesures site uniquement*
  - Forcez la classe des éoliennes si elle n'est pas indiquée dans les *Propriétés* des objets éoliennes.
  - Indiquez les *Mesures site* à utiliser, précisez la *Hauteur principale* et les *Hauteurs pour le calcul du cisaillement*.
  - Indiquez les *Données long terme* à utiliser (si disponibles).
  - Indiquez l'implantation des éoliennes à utiliser, si votre projet en contient plusieurs.
  - S'il y a plusieurs mâts de mesures, indiquez les *Associations éoliennes-mesures site*.
  - Lancez la *Correction long terme* des mesures.
  - Dans les *Contrôles*, sélectionnez les *Contrôles principaux* et les *Contrôles additionnels* à effectuer.
  - Lancez les *Contrôles*, modifier si nécessaire le paramétrage avant de *Calculer*.
  - Examinez les résultats des *Contrôles*.
  - Lancez la génération du rapport, notez que certains résultats peuvent être exportés en format texte en utilisant la commande *Résultats calculs* -> *fichiers*.
- Contexte 3) : *Pas de mesures site*
  - Choisissez les *Modèles d'écoulement*.
  - Forcez la classe des éoliennes si elle n'est pas indiquée dans les *Propriétés* des objets éoliennes.
  - Indiquez l'implantation des éoliennes à utiliser, si votre projet en contient plusieurs.
  - Faites le *Choix de(s) objet(s) Données-site* que WAsP devra utiliser et *Lancez le calcul WAsP*.
  - Faites le *Choix de l'objet Données-site* que WEng devra utiliser et *Lancez le calcul WEng*.
  - Dans les *Contrôles*, sélectionnez les *Contrôles principaux* et les *Contrôles additionnels* à effectuer.
  - Lancez les *Contrôles*, modifier si nécessaire le paramétrage avant de *Calculer*.
  - Examinez les résultats des *Contrôles*.
  - Lancez la génération du rapport, notez que certains résultats peuvent être exportés en format texte en utilisant la commande *Résultats calculs* -> *fichiers*.

## 13.1 Préparation préalable

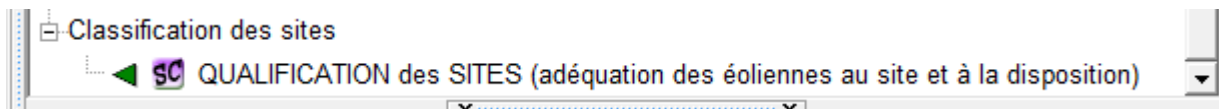
Avant de lancer le calcul *QUALIFICATION des SITES*, assurez-vous que vous avez une licence permettant l'utilisation du module et que le projet que vous avez créé dans WindPRO contient :

- 1) La disposition correcte des éoliennes du parc,
- 2) Un objet *Données-lignes* ou *Maille-altimétrique* décrivant l'orographie du site,
- 3A) Un objet *Météo* avec les mesures faites sur le site à plusieurs hauteurs (soigneusement examinées et délimitées de façon à couvrir un nombre entier d'années),

et/ou

- 3B) Un objet *Données-site* (pointant sur une statistique éolienne),  
Une licence WAsP,  
Une licence WEng 3.0.

Lancez le calcul *QUALIFICATION des SITES* :



Dans la fenêtre *QUALIFICATION des SITES* parcourez les onglets et entrez les informations correspondant au contexte de votre étude.

### 13.1.0 Onglet Principal

Dans cet onglet on indique le contexte de travail (décrit antérieurement) en choisissant les options adéquates sous *Contrôle du site et de la disposition avec* et sous *Modèles d'écoulement*. Voir Figure 2.

Nom

**Contrôle du site et de la disposition avec:**

Mesures et modèle d'écoul.

Mesures site uniquement

Pas de mesures site

**Modèles d'écoulement:**

WEng 3 (WAsP Engineering)

WAsP avec:

Stat. éolienne(s) corrigée(s) long terme

Mesures site

**Norme de conception: IEC61400-1 ed. 3 (2010)**

Utiliser classes objets Eoliennes

Forcer la classe des éoliennes à

Classes définies par la norme:

Classes de vit. du vent	I	II	III	S
Vréf [m/s]	50,0	42,5	37,5	
Vmoy. [m/s]	10,0	8,5	7,5	

Classes de turbulence	A	B	C	S
Iréf [-]	0,16	0,14	0,12	

Figure 2.

Pour utiliser les modèles *WAsP* et *WEng*, il faut disposer des licences d'utilisation correspondantes et d'une connexion à Internet car la validité de la licence *WEng* est vérifiée à intervalles réguliers via Internet.

Si la classe n'est pas indiquée individuellement pour chaque machine dans les *Propriétés* des objets éoliennes, on peut *Forcer la classe des éoliennes* à (toutes) dans le menu du même nom.

Le tableau, sous *Classes définies par la norme*, rappelle les valeurs des paramètres de base des trois classes standards. La classe S est librement paramétrable, pour entrer les valeurs correspondantes, il faut choisir la classe S dans le menu *Forcer la classe des éoliennes* à.

### 13.1.1 Onglet Données de vent

Dans cet onglet, voir Figure 3, sont listées toutes les données de vent présentes dans le projet.

On sélectionne les données qui devront être utilisées en cochant le *Nom de l'objet Météo* contenant les données.

Après la *Sélection des données*, il faut indiquer le type d'utilisation qui doit en être faite à l'aide des menus déroulants de la colonne *Type d'utilisation*.

Les menus proposent trois choix : *Mesures site*, *Données long terme* et *Données climatiques*.

Si les *Mesures sites* ont été faites à plusieurs hauteurs, il faut choisir la *Hauteur principale* qui sera utilisée pour les *Contrôles* et par *WAsP* quand les options *WAsP avec Mesures site* sont cochées dans l'onglet *Principal*. Dans la colonne *Sélection hauteurs pour calcul cisaillement*, il faut également cocher les hauteurs (y compris la *Hauteur principale*) qui devront être utilisées pour calculer les valeurs du cisaillement.

Les fonds rouges des champs, *Périodicité*, *Durée* et *Taux acquisition*, signalent que les valeurs sont inadéquates et potentiellement source de problèmes. Par exemple quand les données ne sont pas conformes à la « norme IEC » qui requiert des données de *Périodicité* égale à 10mn et des *Durées* multiple d'une année entière afin d'éviter les biais saisonniers.

Les *Données long terme* servent à faire la correction des mesures pour les rendre représentatives du long terme.

Les *Données climatiques* permettent d'introduire les températures si elles n'ont pas été enregistrées dans les *Mesures sites*.

Sélection des données	Type d'utilisation	Hauteur principale	Sélection hauteurs (au moins 2) pour calcul cisaillement	Périodicité [mn]	Durée ("Utilisées") [ans]	Taux acquisition ("Utilisées") [%]	Premier relevé	Dernier relevé
<input type="checkbox"/> Mât-1								
<input checked="" type="checkbox"/> Mât-2	Mesures site							
<input checked="" type="checkbox"/> 49,0m -		<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	10,0	1,0	100,0	20/10/2001 00:1	19/10/2002 21:2
<input checked="" type="checkbox"/> 48,0m -		<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	10,0	1,0	100,0	20/10/2001 00:1	19/10/2002 21:2
<input checked="" type="checkbox"/> 24,0m -		<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	10,0	1,0	100,0	20/10/2001 00:1	19/10/2002 21:2
<input checked="" type="checkbox"/> Données MERRA	Données long terme							
<input checked="" type="checkbox"/> 50,0m -		<input checked="" type="radio"/>		60,0	30,7	99,9	01/01/1982 01:0	01/09/2012 00:0
Vmoy. vent								
Dir. vent								

Figure 3

### 13.1.2 Onglet Eoliennes

Dans cet onglet, voir Figure 4, sont choisies les *Nouvelles-éoliennes* qui seront l'objet des *Contrôles*. La sélection des éoliennes se fait comme dans les autres calculs WindPRO.

Notez que les sillages des *Eoliennes-existantes* sélectionnées seront pris en compte, mais elles ne seront pas contrôlées.

Les options du cadre au bas de la fenêtre permettent de désigner les éoliennes dans les graphiques, les tableaux et les rapports par le texte de leur *Description* ou de leur *Label utilisateur*, au choix.

Il ne faut pas configurer les éoliennes en mode bridé car l'extraction de la vitesse du vent à la puissance nominale, nécessaire aux *Contrôles*, se fait à partir de la courbe de puissance active.

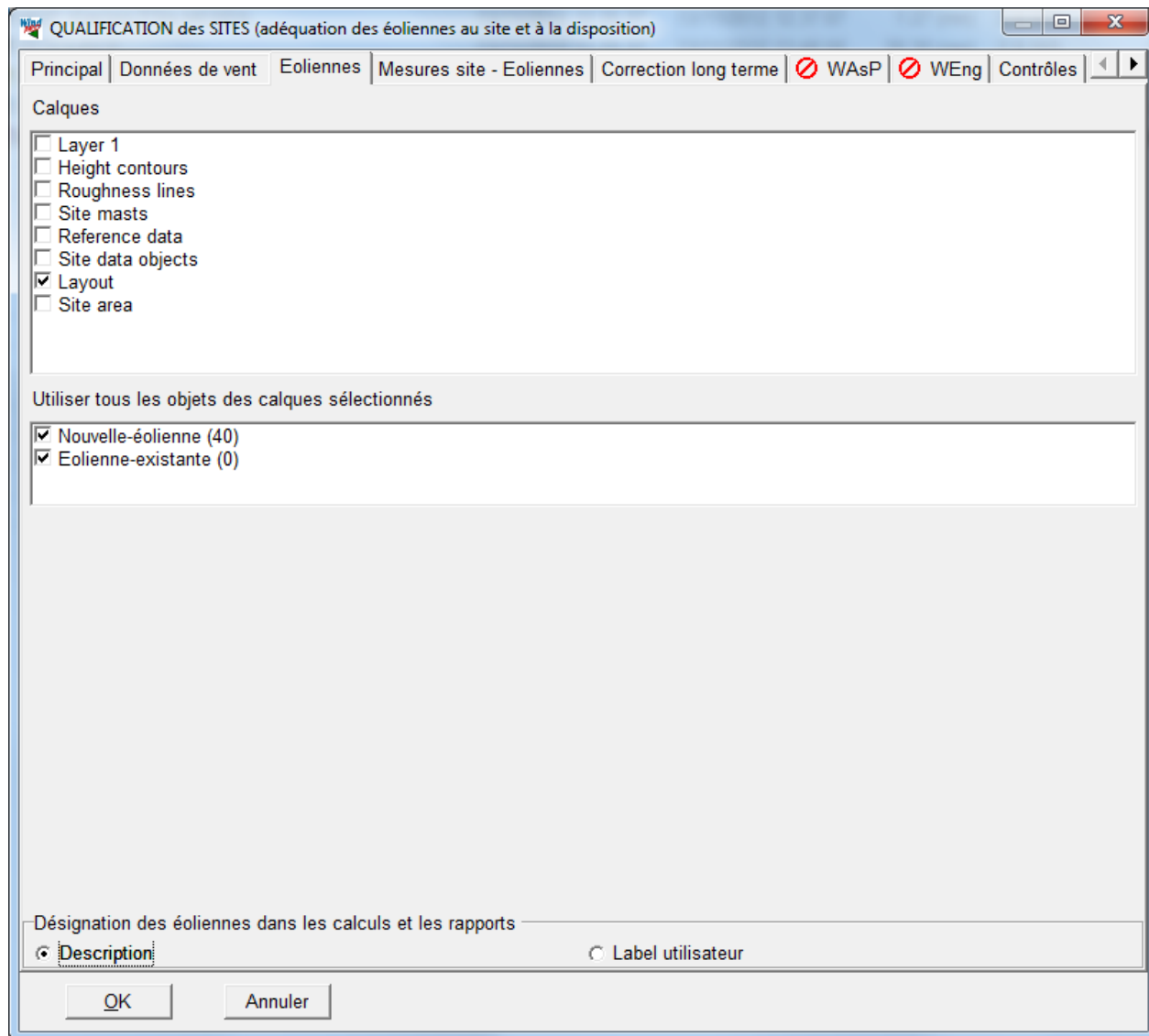


Figure 4



### 13.1.3 Onglet Mesures site – Eoliennes

Cet onglet, voir Figure 5, n'est présent qu'avec les options *Mesures et modèle d'écoulement* et *Mesures site uniquement* de l'onglet *Principal*.

Si, dans le projet, plusieurs jeux de *Mesures site* sont disponibles, par défaut, les *Contrôles* se feront avec les *Mesures site* les plus proches de chaque éolienne.

L'option *Choix associations éolienne-mesures site* permet de modifier l'association par défaut.

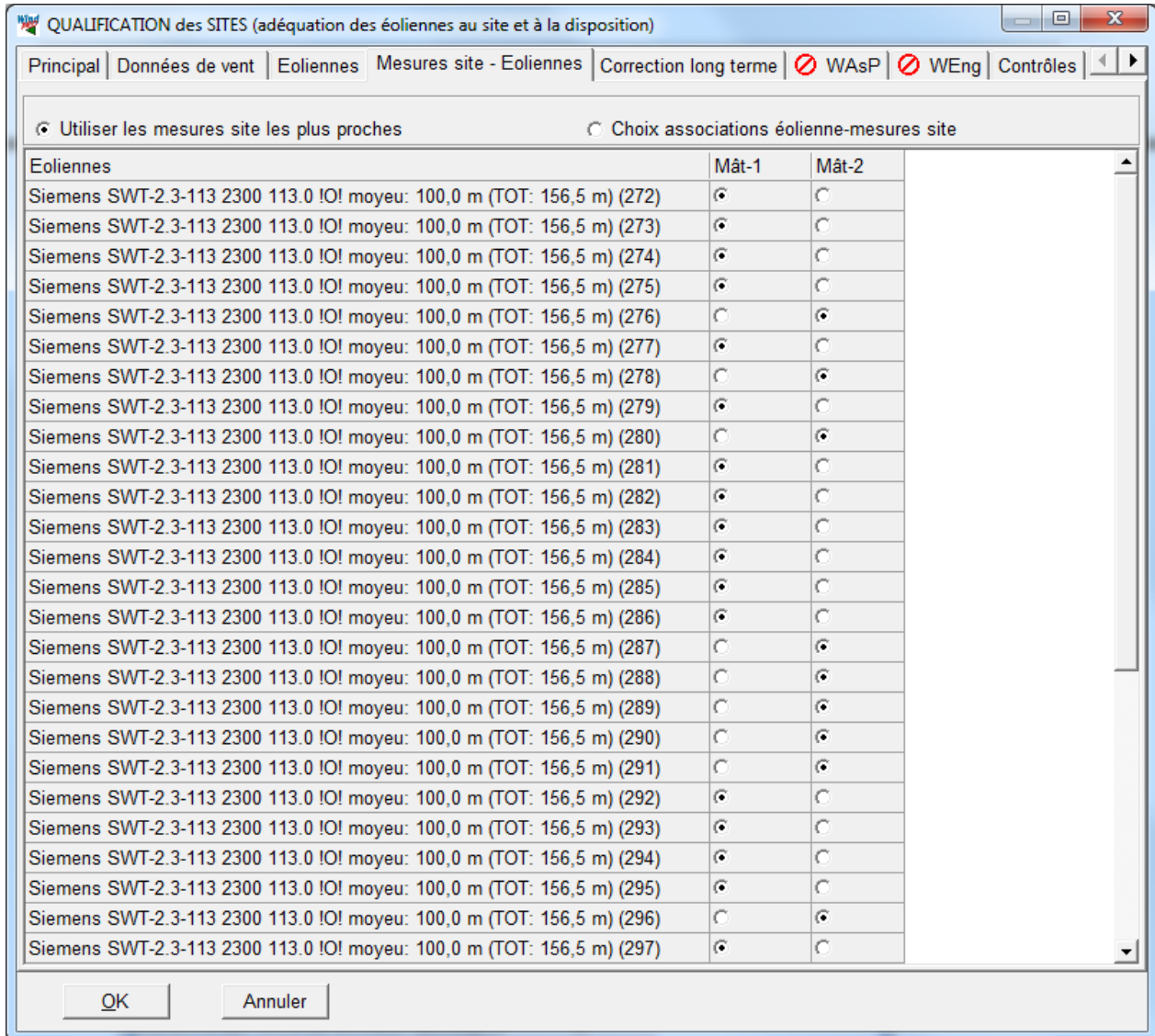


Figure 5

### 13.1.4 Onglet Correction long terme

Cet onglet, voir Figure 6, n'est présent qu'avec les options *Mesures et modèle d'écoulement + WAsP avec Mesures site* et *Mesures site uniquement* de l'onglet *Principal*. Cet onglet permet la correction long terme des *Mesures site* sans quitter le module *QUALIFICATION des SITES*.

Cette possibilité, est une alternative commode à la procédure habituelle où une statistique éolienne est générée à partir des *Mesures site* corrigées pour le long terme avec le module *MCP*.

La correction long terme faite avec *QUALIFICATION des SITES* est basée sur le même principe que la méthode *Indicielle* de *MCP* mais, ici, l'indice utilisé se rapporte à la vitesse du vent alors que l'indice utilisé par *MCP* se rapporte au productible. Ce choix se justifie par le fait que *QUALIFICATION des SITES* étudie les efforts supportés par les éoliennes et non les productibles.

Si des *Données long terme* sont présentes, mais qu'on ne souhaite pas effectuer de correction il suffit de cocher l'option *Pas de correction...* et de passer à l'étape suivante.

Si des *Données long terme* couvrant la période des *Mesures site* sont présentes, cochez l'option *Calcul de la correction...*, et lancez le *Calcul des corrections* en cliquant sur le bouton de même nom.

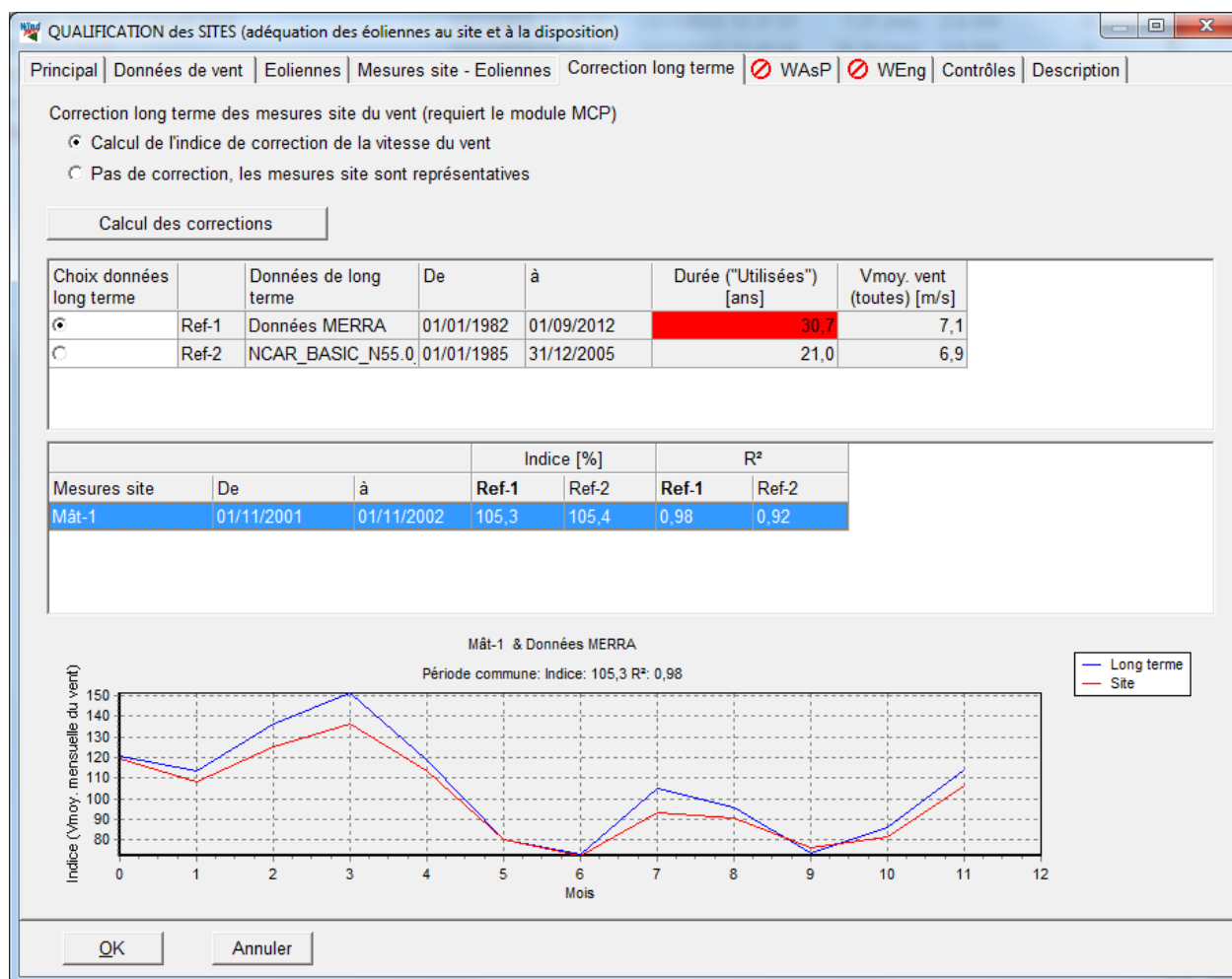


Figure 6

Le coefficient de corrélation  $R^2$  indique quel jeu de *Données de long terme* est le plus pertinent pour faire la correction. L'*Indice* indique la correction à faire pour rendre les *Mesures site* représentatives du long terme.

Le coefficient de corrélation est calculé sur la période commune aux *Mesures site* et aux *Données de long terme*. L'*Indice* est calculé à partir des *Données de long terme* en faisant le rapport, exprimé en pourcentage, de la vitesse moyenne du vent calculée sur la période commune par la vitesse moyenne du vent calculée sur toute la période.

### 13.1.5 Onglet WAsP

Selon le choix fait dans l'onglet *Principal* l'onglet *WAsP* se présente différemment.

#### Mesures et modèle d'écoulement + WAsP avec Mesures site :

Il faut indiquer dans le menu déroulant *Choix objet Données-site* l'objet que WAsP doit utiliser pour calculer les statistiques éoliennes à partir des *Mesures site*. Voir Figure 7.

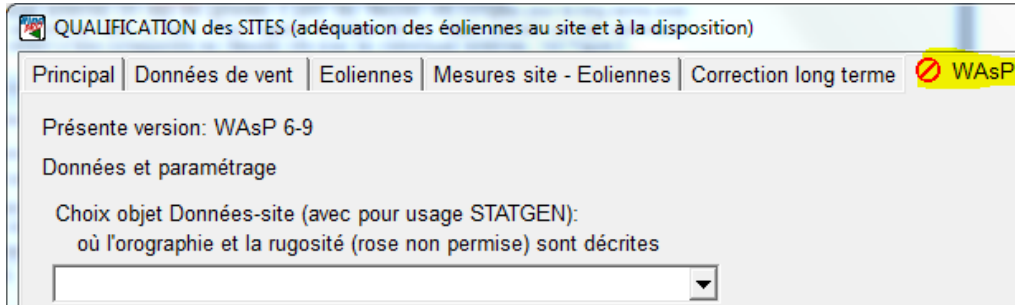


Figure 7

#### Mesures et modèle d'écoulement + WAsP avec Stat. Eolienne(s) corrigée(s) long terme :

Si les statistiques éoliennes ont déjà été générées à partir des *Mesures site* corrigées pour le long terme avec *MCP*, il faut sélectionner dans le menu *Choix objet(s) Données-site* les objets pointant sur ces statistiques éoliennes en veillant à faire correspondre les *Mesures site* avec les statistiques éoliennes. Voir Figure 8.

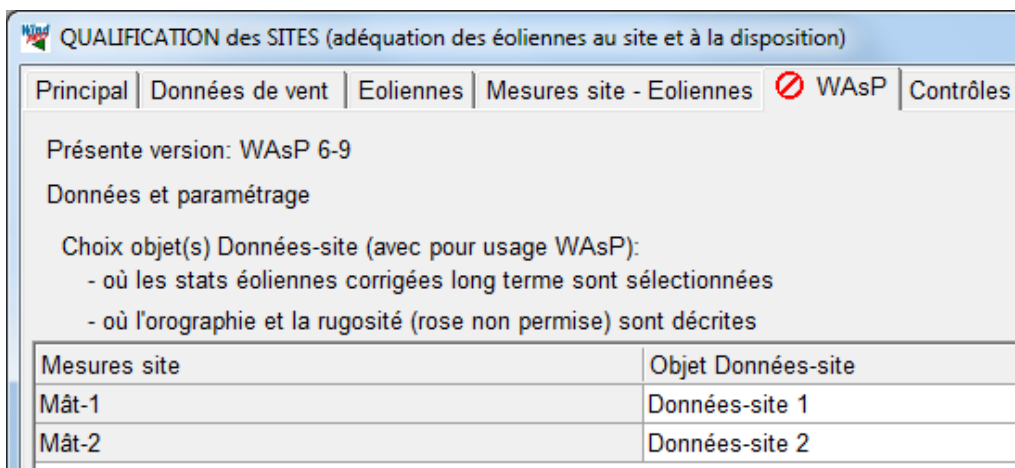


Figure 8

#### Pas de mesures site + WAsP avec Stat. Eolienne(s) corrigée(s) long terme :

Si on ne dispose que de statistiques éoliennes, il faut sélectionner dans le menu *Choix objet(s) Données-site* les objets pointant sur ces statistiques éoliennes. Les *Contrôles* se feront avec la statistique la plus proche de chaque éolienne. Voir Figure 9.

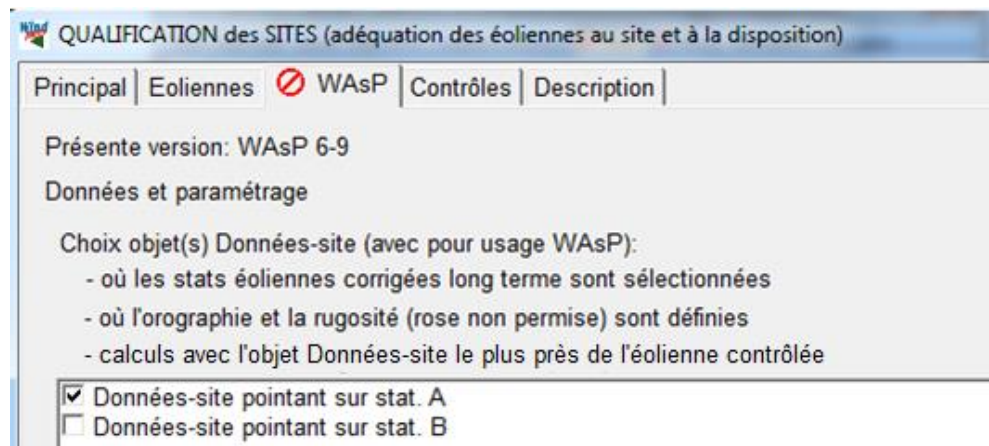


Figure 9

Quand le *Choix de(s) Objet(s) Données-site* est terminé, il faut *Lancer les calculs WAsP* en cliquant sur le bouton du même nom. Voir Figure 10.

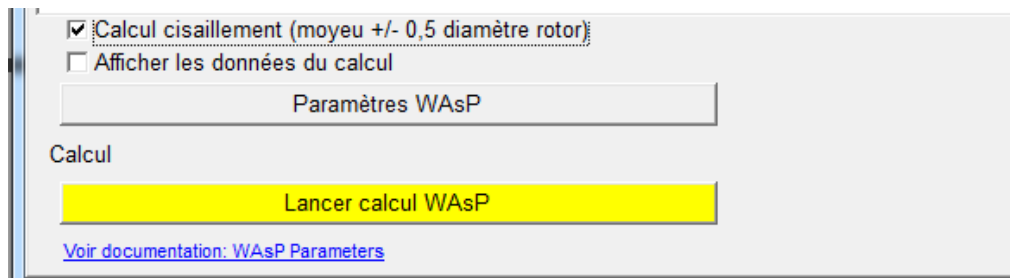
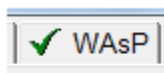
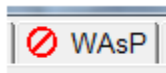


Figure 10



La fin des calculs WAsP est signalée par la coche verte qui remplace le signe interdit dans l'onglet.

Note : les translations de hauteur introduites dans les objets Météo et/ou Eoliennes sont prises en compte dans les calculs WAsP.

### 13.1.6 Onglet WEng

Depuis la version 2.8, WindPRO intègre une interface graphique utilisateur (GUI) qui simplifie l'utilisation de WEng comme c'est déjà le cas pour WAsP. A cet effet, WEng doit être installé et activé sur l'ordinateur de l'utilisateur. Le modèle d'écoulement WEng est différent du modèle WAsP. Il est fondé sur le calcul des paramètres de l'écoulement (sauf la turbulence) en chaque nœud d'une maille rectangulaire dont l'étendue et la résolution sont définies par l'utilisateur.

Le paramétrage se fait dans l'onglet *WEng*, voir Figure 11.

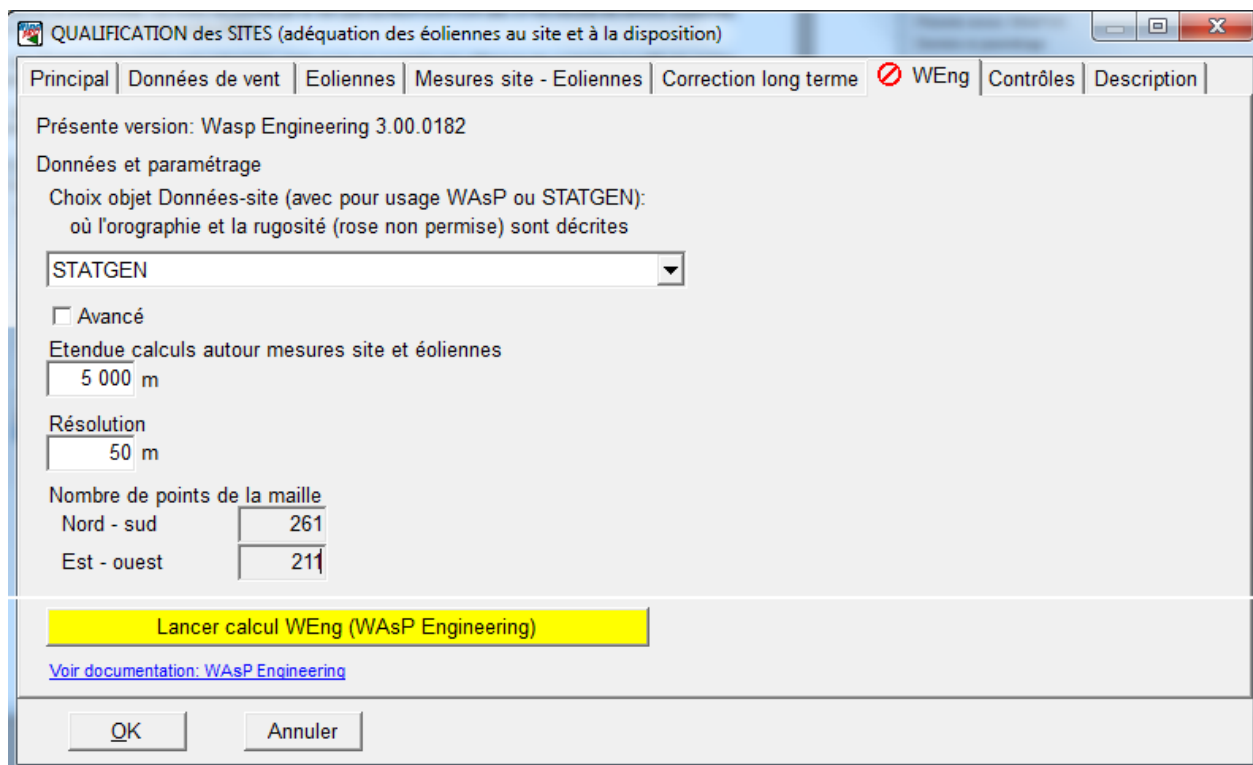


Figure 11

Le menu *Choix objet Données site* permet de sélectionner l'objet à partir duquel l'orographie et les rugosités du site seront transférées à WEng.

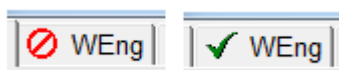
Le champ *Etendue des calculs autour des mesures site et des éoliennes*, sert à définir l'étendue de la maille de calcul. La valeur par défaut – 5000 m – est un compromis entre la précision et le temps de calcul. Cette valeur doit être adaptée à l'environnement du site, il faut l'augmenter, si par exemple il y a un changement de rugosité marqué juste au-delà des 5000 m.

Le Champ *Résolution* permet de définir la résolution de la maille de calcul. La valeur par défaut – 50 m – est adaptée aux contextes habituels. Cette valeur doit être augmentée si le relief du site est très escarpé.

Les valeurs des champs *Nombre de points de la maille* sont déterminées par les valeurs entrées dans les champs *Etendue des calculs autour des mesures site et des éoliennes* et *Résolution*. La technique du « zéro-padding » utilisée par WEng fait que les temps de calculs augmentent par paliers, 170 points, 340 points, 680 points..., il est donc intéressant de s'approcher des paliers pour gagner en précision et/ou en étendue sans augmentation du temps de calcul.

La présente version de *QUALIFICATION des SITES* n'intègre pas l'utilisation d'obstacles.

Quand le paramétrage est terminé, il faut *Lancer les calculs WEng* en cliquant sur le bouton du même nom. Les calculs peuvent durer plusieurs minutes ; c'est le calcul de la turbulence aux emplacements des mesures et des éoliennes qui allonge la durée.



La fin des calculs WEng est signalée par la coche verte qui remplace le signe interdit dans l'onglet.

### 13.1.6.0 Paramétrage Avancé

Avant de *Lancer les calculs WEng*, il convient, dans certains cas, de modifier les paramètres *Avancés*, voir Figure 12.

<input checked="" type="checkbox"/> Avancé		Paramétrage du vent géostrophique réduit	
Etendue calculs autour mesures site et éolienne	6 000 m	Vit. vent	20,0 m/s
Résolution	50 m	Hauteur	10,0 m
Nombre de points de la maille		Secteurs	12
Nord - sud	322	Longueur rugosité	0,0500 m
Est - ouest	304	Calcul turbulence	
		<input type="radio"/> Aucun <input checked="" type="radio"/> Kaimal <input type="radio"/> Scanlan	

Figure 12

#### Paramétrage du vent géostrpphique réduit :

WEng est un modèle linéarisé des écoulements du vent et par conséquent les variations relatives de la vitesse du vent et de l'intensité de la turbulence sont indépendantes de ce paramétrage.

Cependant, dans certaines situations particulières il faut être vigilant. Par exemple, dans le cas des sites offshores ou côtiers, le modèle linéarisé ne prend pas en compte l'augmentation de la rugosité de la mer avec la vitesse du vent. Il convient alors de faire les calculs WEng, de faire les *Contrôles*, d'ouvrir le rapport *QUALIFICATION des SITES* résultant et d'exporter les résultats du calcul WEng en utilisant la commande *Résultats calculs -> fichiers*. Pour chaque éolienne, les vitesses extrêmes du vent obtenues devraient être approximativement les mêmes que les vitesses extrêmes prévues, si ce n'est pas le cas modifiez la vitesse du vent géostrophique pour qu'elles coïncident.

#### Calcul turbulence :

On peut choisir de ne faire *Aucun* calcul de turbulence ou d'utiliser le modèle *Scanlan*. Nous recommandons de conserver le modèle *Kaimal* présélectionné par défaut.

Note : les *Translations de hauteur* introduites dans les objets *Météo* et/ou *Eoliennes* sont prises en compte dans les calculs WEng. Habituellement, l'introduction d'une *Translation de hauteur* se traduit par une diminution de la vitesse du vent et une augmentation de la turbulence et du cisaillement.

## 13.2 Contrôles principaux

Quand la préparation préalable, décrite dans les pages précédentes, est terminée, on peut lancer les contrôles définis dans l'IEC 61400-1 ed. 3 (2010). Le lancement se fait à partir de l'onglet *Contrôles*, voir Figure 13.

Pour lancer un *Contrôle*, il faut le cocher dans la colonne *Sélection* puis cliquer sur bouton *Lancer* dans la colonne *Paramétrage des contrôles*. Il est recommandé d'effectuer tous les *Contrôles*.

Le bouton *Lancer* est remplacé par un avertissement si tous les prérequis ne sont pas satisfaits. Ainsi, le contrôle des *Angles des écoulements* (si WEng n'est pas utilisé) et le contrôle des *Turbulences effectives* ne sont pas possibles si le contrôle de la *Complexité du terrain* n'a pas été effectué auparavant.

Le *Résultat* de chaque contrôle est donné sous forme d'une signalisation tricolore dont la *Légende résultat* donne l'interprétation. C'est l'éolienne du parc éolien qui est soumise aux conditions les plus difficiles qui détermine le *Résultat* qui sera affiché. Les résultats individuels pour chacune des éoliennes du parc sont donnés dans le calcul.

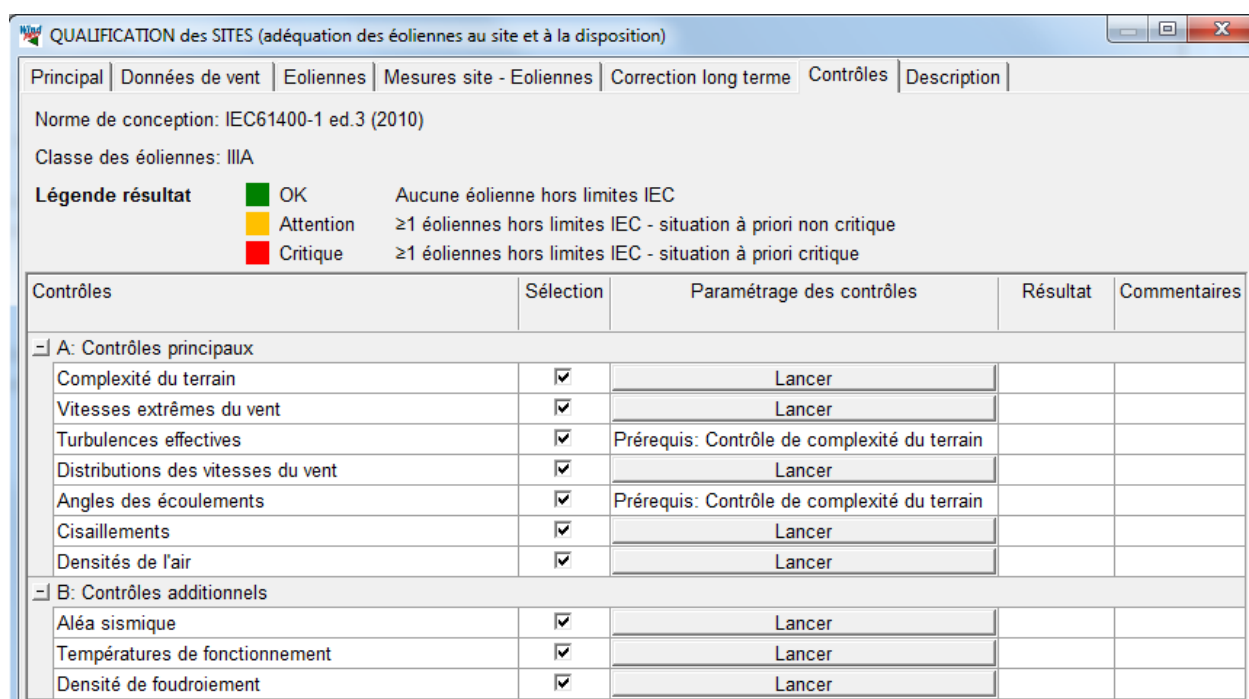


Figure 13

### Note :

Un, et même plusieurs contrôles, dont le résultat est CRITIQUE ne signifie pas obligatoirement que la classe de machine choisie doit être exclue sans appel. Les contrôles CRITIQUES doivent être analysés avec le fabricant. Seul lui connaît les marges de sécurité prises lors de la conception et seul lui dispose du modèle aéroélastique de la machine permettant de déterminer si globalement les contrôles OK peuvent compenser les contrôles CRITIQUES.

## 13.2.0 Complexité du terrain

### 13.2.0.0 Description du contrôle et effets de la complexité.

La procédure de contrôle de la complexité du terrain définie par la « norme IEC » est assez compliquée. Elle requiert d'évaluer les pentes et les variations de pente du terrain autour des éoliennes. A cet effet, plusieurs disques, de différents rayons, centrés sur l'éolienne sont définis. Ensuite, soit le disque soit les secteurs du disque sont « ajustés » avec un plan et ce sont les pentes et les variations des pentes ces différents plans qui sont analysées.

Le résultat du contrôle de *Complexité du terrain* n'est pas déterminant en soi. Il sert principalement à faire la *Correction de la structure de la turbulence* extraite des mesures du vent, car les anémomètres à coupelles ne donnent que les composantes horizontales de la turbulence, or, en terrain complexe, une part non négligeable de l'énergie de la turbulence est contenue dans sa composante verticale.

### 13.2.0.1 Paramétrage, calculs et résultats

La suite décrit la configuration et le calcul de la complexité du terrain qui sont très simples.

#### Onglet *Données et paramétrage*

Voir Figure 14.

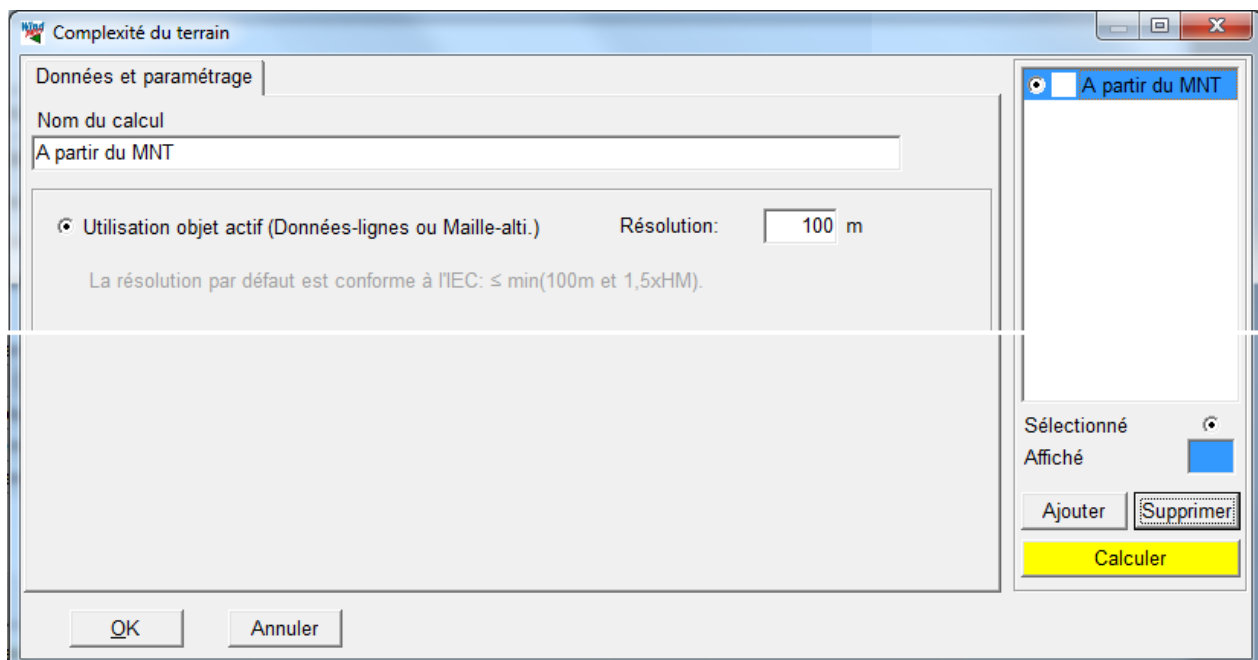


Figure 14

Le module utilise les données altimétriques présentes dans le projet, elles sont extraites de l'*objet actif* qui peut être soit un objet *Données-lignes* soit un objet *Maille-altimétrique*.

La seule grandeur paramétrable est la *Résolution* de la maille altimétrique régulière établie pour les besoins du contrôle. La « norme IEC » indique que la taille du maillage ne doit pas excéder la plus petite des deux valeurs suivantes : 1,5 fois la hauteur du moyeu de l'éolienne ou 100 m. La valeur proposée par défaut est toujours conforme cette préconisation.

Ensuite, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. La durée du calcul est allongée si le MNT n'a pas été calculé pour l'ensemble du site (voir paramétrage objet *Données-lignes*). A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

Onglet Résultats (graphiques)

Voir Figure 15.

Plusieurs nouveaux onglets apparaissent à la fin du calcul et l'affichage saute automatiquement sur l'onglet *Résultats (graphiques)* qui présente l'*Indice de complexité* du terrain, tel que défini par la « norme IEC », pour chaque emplacement d'éolienne.

Un emplacement est *Complexe* si son indice =1 et *Non complexe* si son indice = 0 ; un indice compris entre 0 et 1 signale que l'emplacement est en partie complexe.

Dans le cadre de droite, le carré devant le nom du calcul (ici *A partir du MNT*) est devenu vert, cela indique que le résultat est OK et que par conséquent la complexité du terrain ne sera pas source de « problèmes ».

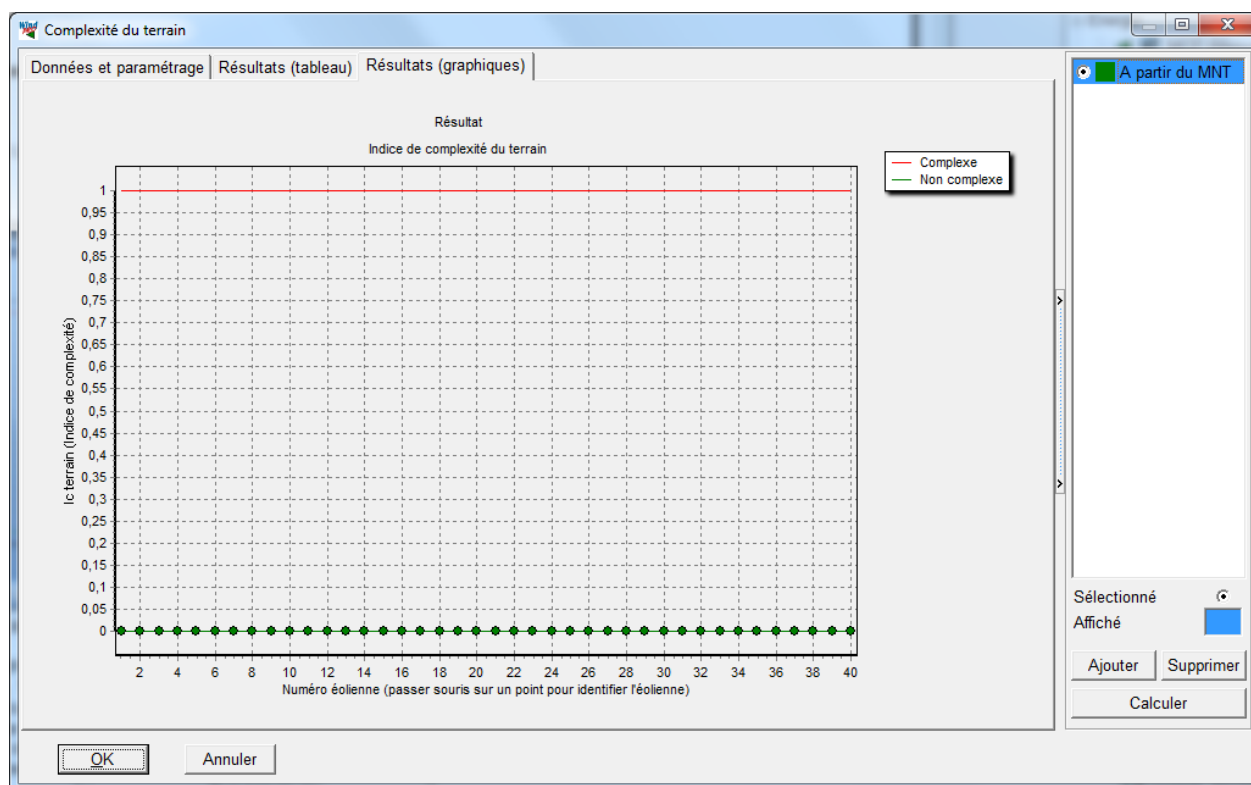


Figure 15

Le module *QUALIFICATION des SITES* permet de répéter un contrôle en utilisant un autre paramétrage (ici le seul paramètre modifiable est la *Résolution*)



Pour répéter un calcul, il suffit de cliquer sur le bouton *Ajouter*, de modifier les paramètres et de cliquer sur le bouton *Calculer*, voir Figure 16. Cela permet de tester la sensibilité des résultats aux paramètres.

Les noms des calculs peuvent être modifiés dans l'onglet *Données et paramétrage* sans avoir à les refaire.

Quand plusieurs calculs ont été faits, les résultats correspondants peuvent être *Affichés* en cliquant sur le nom du calcul qui apparaît alors sur fond bleu. Le calcul *Sélectionné* est celui qui est retenu pour les besoins du contrôle. Voir Figure 16.

Figure 16



Onglet Résultats (tableau)

Voir Figure 17.

Cet onglet permet d'analyser les résultats éolienne par éolienne.

La colonne *lc* donne la valeur de l'indice de complexité calculé. Les valeurs sont présentées sur fond vert (OK) quand elles sont égales à 0, sur fond orange (*Attention*) quand elles supérieures à 0.

Un clic sur le « + » devant une éolienne fait apparaître trois sous-niveaux,  $R=20*HH$ ,  $R=10*HH$  et  $R=5*HH$  qui montrent les résultats de l'analyse du terrain sur des rayons égaux à 20 fois, 10 fois et 5 fois la hauteur du moyeu de l'éolienne.

Un clic sur le « + » devant un sous-niveau, affiche les valeurs, pour chaque secteur, de la *Pente* et de la contribution à la production d'*Energie*. Plus de détails sur le calcul de ces valeurs sont donnés en 13.2.0.2.

Eoliennes	lc	Energie (partie complexe) [%]	Complexe	Direction [Deg]	Pente [Deg]	Energie [%]	Limite
Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ R=20*HH		0,0					
+ R=10*HH		0,0	False	0,0	-0,2	3,0	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	30,0	-0,3	5,0	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	60,0	-0,6	3,8	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	90,0	-0,7	3,3	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	120,0	-0,4	3,7	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	150,0	-0,3	3,8	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	180,0	0,3	7,9	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	210,0	0,6	13,2	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	240,0	0,4	22,2	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	270,0	0,4	21,9	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	300,0	0,6	8,1	5,0
+ R=10*HH		0,0	False	330,0	0,3	3,9	5,0
+ R=5*HH		0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					
+ Siemens SWT-2.3-113 2300	0,0	0,0					

Figure 17

### 13.2.0.2 Méthodologie IEC d'analyse de la complexité du terrain.

La taille du maillage utilisée pour l'analyse (*Résolution*) ne doit pas excéder la plus petite des deux valeurs suivantes : 1,5 fois la hauteur du moyeu de l'éolienne ou 100 m.

L'analyse se fait sur 25 zones définies [2] comme suit :

- 1 disque centré sur l'éolienne dont le rayon = 5 hauteurs de moyeu.
- 12 secteurs découpés sur un disque centré sur l'éolienne dont le rayon = 10 hauteurs de moyeu.
- 12 secteurs découpés sur un disque centré sur l'éolienne dont le rayon = 20 hauteurs de moyeu.

La Figure 18 illustre les zones de l'analyse, les proportions sont données par le cercle dont le rayon = 5 hauteurs de moyeu.

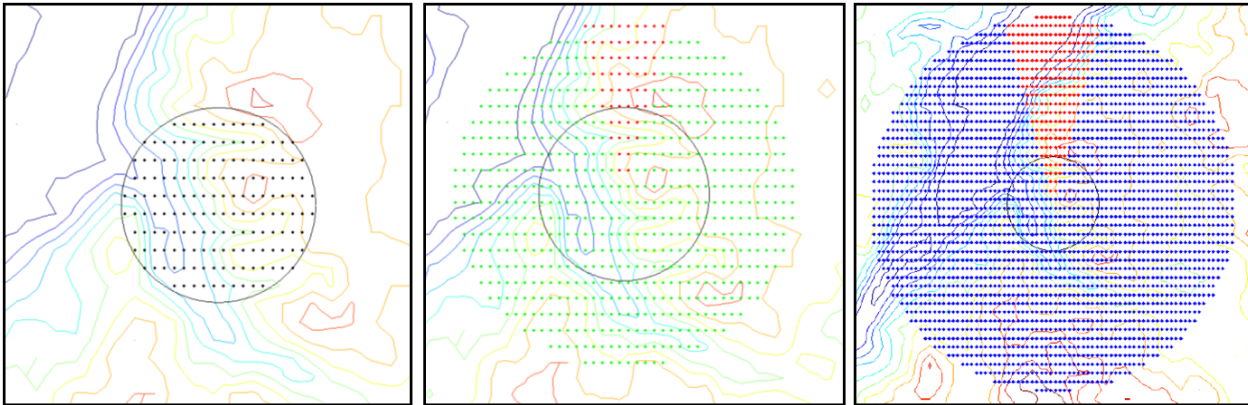


Figure 18

Pour chacune de ces 25 zones on calcule le plan passant par le pied de l'éolienne qui s'ajuste au mieux à la surface du terrain.

A partir de ces plans, les grandeurs du tableau suivant sont analysées [2].

Rayon de l'analyse	Nbre de secteurs analysés	Taille des secteurs	Pente maximale	Ecart d'altitude maximal	Aire maximale des surfaces dépassant l'écart max. d'altitude
5 x HM	1	360°	10°	0,3 x HM	5 x HM <sup>2</sup>
10 x HM	12	30°	10°	0,6 x HM	5 x HM <sup>2</sup>
20 x HM	12	30°	10°	1,2 x HM	5 x HM <sup>2</sup>

- 1) Pente :
  - pour le disque = 5 x HM, il s'agit de la pente maximale du plan
  - pour les secteurs, il s'agit de la pente du plan le long de la bissectrice du secteur.
- 2) Ecart d'altitude : pour un point donné, il s'agit de la différence entre son altitude sur la surface du terrain et l'altitude de sa projection sur le plan ajustant le secteur.
- 3) Aire des surfaces dépassant l'écart max. d'altitude : il s'agit de l'aire des surfaces de la zone analysée dont les points ne respectent pas l'écart 2).

L'indice de complexité du terrain  $I_c$  est calculé à partir de ces grandeurs.

La contribution de chaque secteur à la production d'énergie (estimée à partir des distributions de Weibull) est prise en compte pour le calcul de l'indice de complexité de la manière suivante :

- s'il y a des secteurs dont la contribution à la production d'énergie est < 5% et dont la pente maximale ou l'aire maximale sont hors limites, alors  $I_c = 0$  et la position de l'éolienne est qualifiée de non complexe.
- s'il y a des secteurs dont la contribution à la production d'énergie est > 15% et dont la pente maximale ou l'aire maximale sont hors limites, alors  $I_c = 1$  et la position de l'éolienne est qualifiée de complexe.
- s'il y a des secteurs dont la contribution à la production d'énergie est comprise entre 5% et 15% et dont la pente maximale ou l'aire maximale sont hors limites, alors la valeur de  $I_c$  est interpolée entre 0 et 1 proportionnellement à la contribution à la production d'énergie.

Si l'indice de complexité est > 0, la turbulence mesurée doit être corrigée car les anémomètres à coupelles ne rendent pas compte de sa composante verticale, or en terrain complexe elle contient une part non négligeable de l'énergie de la turbulence.

La *Correction de la structure de la turbulence* se fait avec le paramètre  $C_{CT}$  défini dans la « norme IEC ».  $C_{CT}$  est calculé à partir de l'indice de complexité.

Cette correction doit être appliquée à la turbulence mesurée quand l'indice de complexité est > 0. Cette correction est faite automatiquement par *QUALIFICATION des SITES* préalablement au contrôle des *Turbulences effectives*.

Une note de pied de page de la « norme IEC » signale que la pente du plan ajustant la surface 5 x HM et 360° autour de l'éolienne examinée peut être utilisée pour estimer l'angle de l'écoulement du vent.

Le module *QUALIFICATION des SITES* utilise cette pente pour effectuer le contrôle des *Angles des écoulements*.

## 13.2.1 Vitesses extrêmes du vent

### 13.2.1.0 Description et limites du contrôle

Ce contrôle fait partie des plus importants et c'est probablement celui dont l'utilisation est la plus délicate car, d'une part, les méthodes d'estimation des vitesses extrêmes du vent sont très incertaines et, d'autre part, car les effets sur les éoliennes des vitesses extrêmes ne sont pas compensés par les marges qu'il peut y avoir sur les autres sources de fatigue (*Turbulence effectives, Distribution des vitesses du vent, etc.*)

La « norme IEC » définit la vitesse extrême du vent comme la moyenne sur une période de 10 mn des vitesses du vent dont la période de retour est égale à 50 ans.

Par définition, la période de retour  $T = 1/R$  où  $R$  est la probabilité annuelle pour la grandeur étudiée de dépasser une valeur. Donc une période de retour de 50 ans correspond à vitesse du vent dont la probabilité annuelle d'être dépassée est égale à 2%.

Dans la terminologie IEC la vitesse extrême du vent est désignée par le terme  $V_{ref}$ . Le tableau de la Figure 1 donne les valeurs de  $V_{ref}$  pour les différentes classes. Ainsi, les éoliennes de classe I sont conçues pour résister à une vitesse extrême du vent de 50 m/s à la densité standard de l'air ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ).

La plupart des méthodes d'estimation des vitesses extrêmes du vent se fondent sur les travaux de E. Gumbel [3]. L'annexe-1 rappelle les bases théoriques correspondantes et explique leur utilisation dans *QUALIFICATION des SITES*.

### 13.2.1.1 Calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle des *Vitesses extrêmes du vent*.

#### Onolet Données et paramétrage

Voir Figure 19.

**Vitesses extrêmes du vent**

Données et paramétrage

Nom du calcul  
POT-N\_WEng

Modèle statistique de calcul des vitesses extrêmes du vent

Maxis Annuels (MA) & Gumbel \* (qualité: A)

POT-N & Gumbel N = 20 Δt = 4 jours (qualité: B)

Parente Weibull(EWTS/Bergström) N = 2 302 (qualité: C)

Risø NCEP/NCAR atlas vent extrêmes (qualité: C)

Eurocode EN1991-1-4 Vit. de base vent a) 0,0 m/s Direction ° Secteur auto. Secteur max. (qualité: -)

Modèle d'extrapolation à hauteur de moyeu des vitesses extrêmes du vent

WEng (accélération par secteur) (qualité: A)

WASP (accélération par secteur) (qualité: B)

Cisaillements (extrapol. verticales par sect. uniquement) (qualité: C)

Pas de modèle (util. directe valeurs mod. statistique) (qualité: C)

Utilisation de paramètres supplémentaires

Correction avec données LT \*)

Densité air aux vit. élevées du vent ρ = 1,225 kg/m³

Inclure rafales 3s Kb = 3,0

Préréglage du paramètre k k = 2,34 Par défaut k moy. est appliqué à toutes les éoliennes

\*) il faut au moins 5 années de données  
a) Entrez la valeur de base de la vitesse du vent donnée par l'EN1991-1-4 pour le pays concerné.  
La valeur de base de la vitesse doit être donnée pour la hauteur et la rugosité du paramétrage Avancé de WEng.

OK Annuler

POT-N\_WEng

Sélectionné Affiché

Ajouter Supprimer

Calculer

Figure 19

Le paramétrage se divise en trois parties indépendantes : le choix du *Modèle statistique de calcul des vitesses extrêmes du vent*, le *Modèle d'extrapolation à hauteur de moyeu des vitesses extrêmes du vent* et l'*Utilisation de paramètres supplémentaires*. Les explications correspondantes sont données à la suite de la description du déroulement du contrôle.

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

#### Onglet *Données extraites (tableau)*

Cet onglet présente, sous forme de tableau, les vitesses maximales du vent qui ont été extraites des mesures site utilisées et qui serviront au calcul de l'estimation des vitesses extrêmes du vent, voir Figure 20.

Objet Météo	Méthode	Horodatage	Vitesse du vent [m/s]	Direction
Mât-1	POT-N & Gumbel	01/11/2001 00:20:00	16,3	255
		05/11/2001 03:10:00	18,3	256
		15/11/2001 15:10:00	16,1	237
		22/11/2001 02:40:00	17,0	234
		21/12/2001 06:10:00	18,1	224
		25/12/2001 07:40:00	18,7	217
		01/01/2002 21:40:00	21,5	264
		25/01/2002 01:40:00	22,4	265
		29/01/2002 03:20:00	22,1	257
		04/02/2002 12:00:00	16,7	257
		12/02/2002 20:10:00	19,7	260
		19/02/2002 16:30:00	24,2	304
		27/02/2002	22,5	229
		07/03/2002 13:20:00	17,7	278
		19/03/2002 17:30:00	16,2	259
		27/04/2002 12:20:00	22,9	227

Figure 20

#### Onglet *Données extraites (graphiques)*

Cet onglet, voir Figure 21, montre sur le chronogramme des mesures site, les vitesses maximales listées dans le tableau de l'onglet *Données extraites (tableau)*.

Si plusieurs mâts de mesures ont été utilisés, les boutons sous *Défilement mesures site* permettent de voir les chronogrammes correspondants.

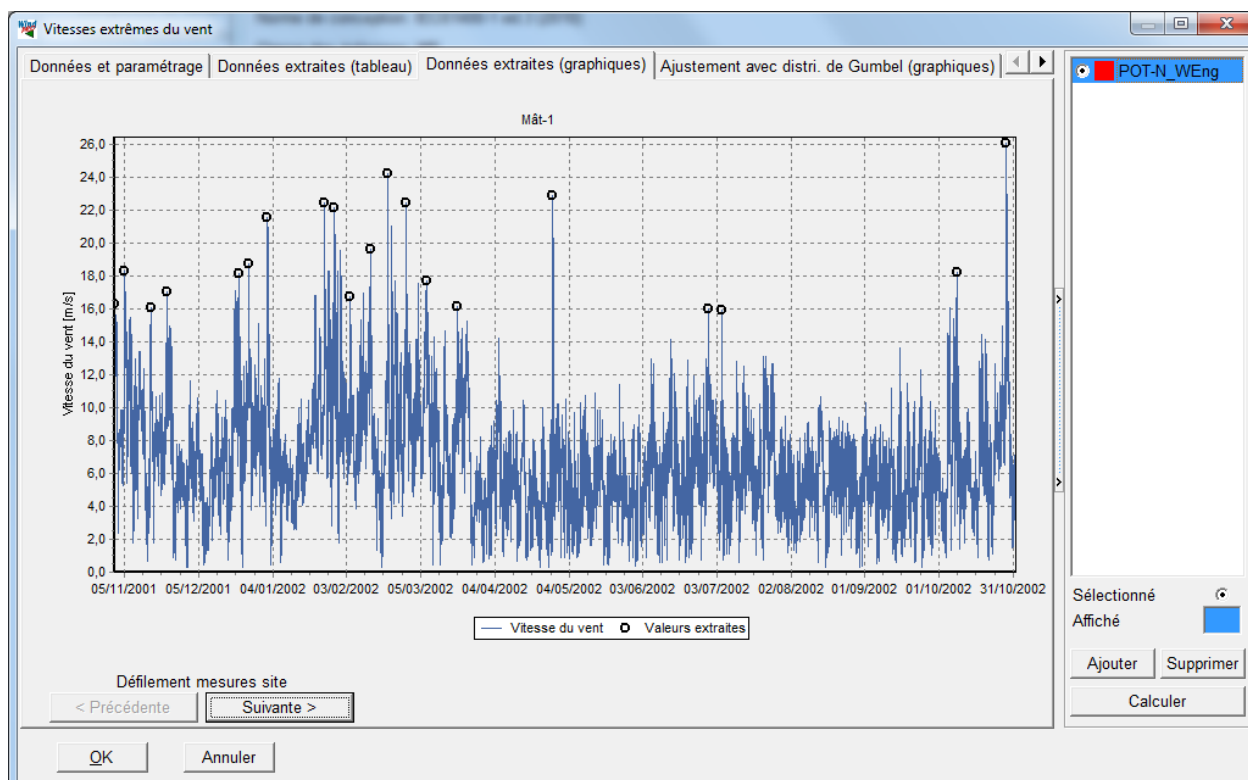


Figure 21

### Onget *Ajustement avec une distribution de Gumbel (graphiques)*

Cet onget, voir Figure 22, montre les vitesses maximales des mesures site, extrapolées à hauteur de moyeu, ajustées par une distribution de Gumbel. Le prolongement de la distribution permet la lecture des vitesses extrêmes et de leur période de retour. Les boutons sous *Défilement éoliennes* permettent de voir la distribution de Gumbel pour chacune des éoliennes du projet.

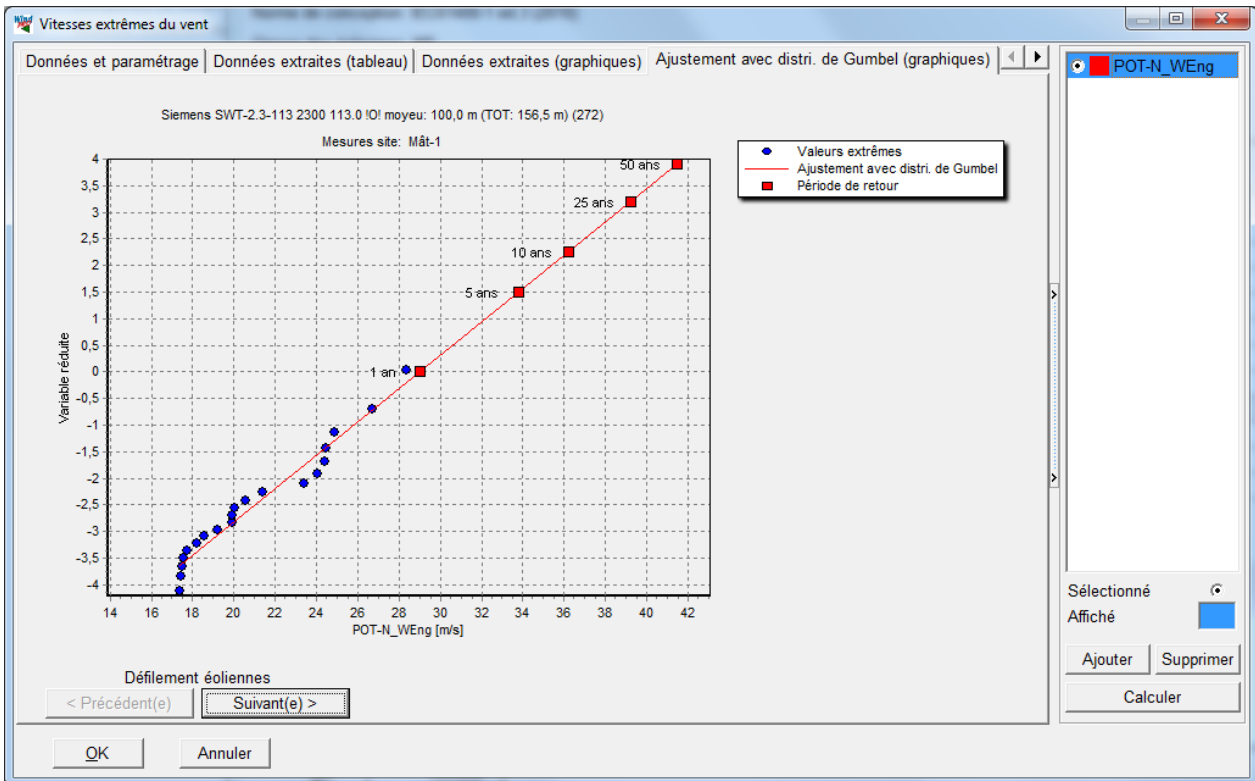


Figure 22

### Onget *Résultats (tableau)*

Le tableau de cet onget, voir Figure 23, met en correspondance, pour chaque éolienne, la vitesse extrême « 50 ans » calculée et la valeur *IEC max (Vref)* de la classe correspondante. Dans cet exemple, toutes les éoliennes sont en rouge (*Critique*) et le résultat du contrôle, représenté par le carré devant le nom du calcul dans le cadre de droite, est aussi en rouge (*Critique*).

Eoliennes	Classe	Objet Météo	u 50 ans [m/s]	IEC max (Vref) [m/s]
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	41,5	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	42,1	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,9	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	41,6	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-2	39,1	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	41,4	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-2	38,7	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,8	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-2	38,8	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,9	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,8	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	41,5	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,7	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,6	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-1	40,9	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-2	39,0	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-2	38,7	37,5
Siemens SWT-2.3-113 2300	IIIB	Mât-2	38,7	37,5

Figure 23

Onglet Résultats (graphiques)

Cet onglet, voir Figure 24, présente les résultats de l'onglet précédent sous forme graphique.

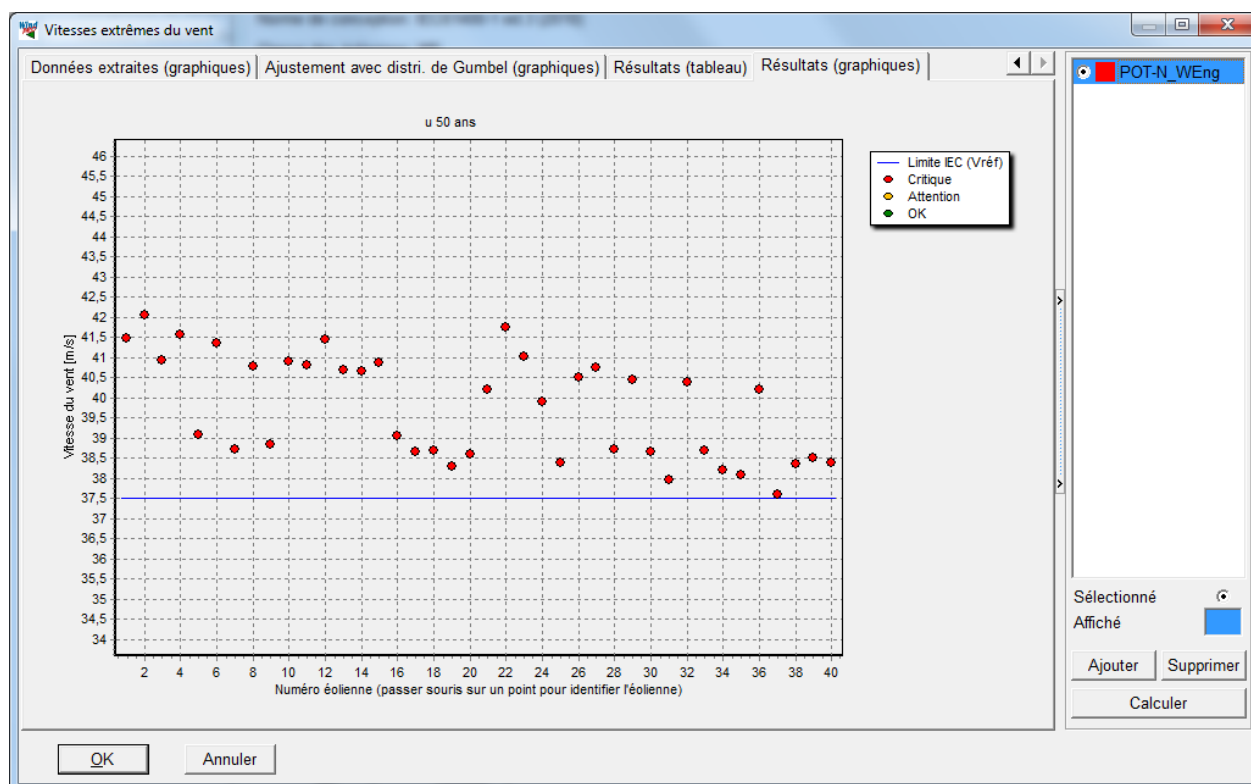


Figure 24

Pour refaire le contrôle en modifiant les paramètres ou en utilisant une autre méthode, il suffit de cliquer sur le bouton *Ajouter*.

On peut, par exemple, choisir la méthode *Parente Weibull (EWTS/Bergstöm)* puis cliquer sur *Calculer*, au bout de quelques instants le nom du nouveau calcul s'affiche dans le cadre de droite. Pour comparer les résultats obtenus, il suffit de les afficher alternativement en cliquant sur leur nom.

Rappel IMPORTANT : c'est le calcul *Sélectionné* qui est retenu pour établir le résultat du contrôle.

### 13.2.1.2 Paramétrage du modèle statistique

Dans ce cadre on choisit la méthode de calcul des vitesses extrêmes du vent et le paramétrage de l'extraction des vitesses maximales du vent quand la méthode POT-N est utilisée, voir Figure 25.

Figure 25

#### Maxi Annuels (MA) & Gumbel

Si les mesures site sélectionnées ne couvrent pas 5 années alors la méthode est affichée en gris et ne peut pas être sélectionnée. Cette méthode extrait la vitesse maximale de chaque année.

L'ajustement de moins de 5 valeurs avec une distribution de Gumbel devient trop sensible à chacune des valeurs et, de manière générale, il est recommandé de travailler avec au moins 7 années de données pour obtenir un résultat fiable. Les MA est le modèle classique de Gumbel, il reste considéré comme le plus fiable à condition de disposer de suffisamment de données ce qui est rarement le cas dans les projets éoliens.

Après avoir extrait la vitesse maximale de chaque année, le module leur applique le modèle classique de Gumbel. L'ajustement de l'asymptote de Gumbel est fait par la méthode des moments de probabilité pondérés, voir [4] ou reportez-vous à l'annexe-1 pour les détails théoriques.

#### POT-N & Gumbel

Pour appliquer cette méthode, il suffit de disposer d'un jeu de mesures site. La méthode est pratiquement identique à celle proposée par WindPRO jusqu'à la version 2.7 pour le calcul des vitesses extrêmes du vent.

POT (Peak-Over-Threshold) signifie que seules les valeurs supérieures à un seuil sont utilisées et  $N$  est le nombre de ces valeurs. Dans la mise en œuvre qui est faite ici, on indique seulement le nombre  $N$  de valeurs à extraire et le  $\Delta t$  minimal entre deux valeurs consécutives afin qu'elles n'appartiennent pas à un même coup de vent. Voir [5] ou reportez-vous à l'annexe-1 pour les détails théoriques.

Cette méthode n'impose aucune durée minimale des mesures site, mais il est vivement recommandé d'utiliser des mesures couvrant une, au moins, ou plusieurs années entières.

Par défaut, le nombre  $N$  de vitesses extraites est fixé à 20 et le  $\Delta t$  minimal entre deux valeurs consécutives est fixé à 4 jours. Cette dernière valeur est issue de l'analyse météo synoptique des coups de vents.

Après avoir extrait les 20 vitesses maximales, le module leur applique le modèle de Gumbel avec une correction du taux annuel de coups de vents, voir [5] ou reportez-vous à l'annexe-1 pour plus d'informations.

L'ajustement de l'asymptote de Gumbel est fait par la méthode des moindres carrés, voir [6].

#### Parente Weibull (EWTS/Bergström)

L'EWTS (European Wind Turbine Standard) [7] propose une méthode d'estimation des vitesses extrêmes du vent qui se fonde sur l'étude de la queue de la distribution de Weibull des vitesses du vent (distribution parente) du site étudié. Elle s'appuie sur le fait que les distributions de Weibull dont la valeur de  $k$  est faible ont une queue plus longue, donc les sites ayant un  $k$  faible ont une plus grande probabilité d'être soumis à des vitesses de vent élevées que les sites avec un  $k$  élevé.

Cette méthode se fonde principalement sur les deux hypothèses suivantes :

- 1) La distribution des vitesses du vent est une distribution de Weibull.
- 2) Le nombre annuel de vitesses statistiquement indépendantes est connu (et identique pour tous les sites).

Le nombre de vitesses 10 mn indépendantes par an donné dans la publication de l'EWTS est égal à 23037. Ce nombre est erroné, le nombre correct qui apparaît dans le papier original de Bergström 1992 [8] est égal à 2302.

Le paramètre  $k$  utilisé est celui de la distribution de Weibull globale reconstituée à partir des Weibulls de chaque secteur, typiquement produits par un calcul WAsP [18], en faisant coïncider la vitesse moyenne (moment d'ordre 1) et l'énergie (moment d'ordre 3).

#### Risø NCEP/NCAR) atlas vents extrêmes

Cette méthode fait appel à une base de données constituée pour les besoins de WEng2 dans le cadre d'un projet de recherche de l'institut Risø [9]. Elle est constituée fichiers REWC (*Regional Extreme Wind Climate*), ces fichiers sont issus des données du NCEP/NCAR et corrigés afin compenser leur faible définition temporelle et spatiale.

Pour utiliser cette méthode, il faut préalablement avoir effectué un calcul WEng (voir 13.1.6). Ensuite, il faut choisir un fichier REWC parmi les quatre les plus proches du site proposés. Chaque fichier contient 360 valeurs du *vent géostrophique réduit* (12 secteurs x 30 ans), ces valeurs sont extrapolées à hauteur de moyeu des éoliennes en utilisant WEng puis traitées par la méthode des *Maxi Annuels* présentée antérieurement.

#### Eurocode EN 1991-1-4

Au cours des dernières décades, dans l'Union Européenne, les anciens codes de la construction des pays membres ont été remplacés par les Eurocodes (EN). Les « Actions générales du vent » sont traitées dans l'Eurocode EN 1991-1-4. Chaque pays a ajouté une annexe où sont données les « Valeurs de base de la vitesse du vent » à utiliser dans les différentes régions climatiques du territoire ainsi que d'autres informations permettant de prendre en compte des particularités comme la haute altitude, etc. La désignation nationale du document reprend le radical de l'Eurocode précédé d'un préfixe propre au pays, en France son nom est NF EN 1991-1-4.

Dans le champ *Vit. de base du vent* il faut entrer la « Valeur de base de la vitesse du vent » donnée par l'EN 1991-1-4. Cette dernière correspond la vitesse du *Vent géostrophique réduit* aux conditions standard à savoir : hauteur au-dessus du sol = 10 m et terrain plat de rugosité uniforme de classe 2 ( $z_0 = 0,05$  m).

Une illustration simple est donnée par le cas du Danemark où la « Valeur de base de la vitesse du vent » est partout égale à 24 m/s excepté sur une bande côtière de 25 km de large où la vitesse croît linéairement pour atteindre 27 m/s sur la côte ouest. Dans les pays avec des régions montagneuses comme la Pologne ou l'Allemagne, l'annexe nationale de l'EN 1991-1-4 donne les facteurs de correction à appliquer aux « Valeurs de base de la vitesse du vent » au-dessus d'une certaine altitude.

La « Valeur de base de la vitesse du vent » est extrapolée à hauteur de moyeu de chaque éolienne en tenant compte du relief et de la rugosité environnante en utilisant WEng. La mise en œuvre de la méthode Eurocode EN 1991-1-4 est impossible sans WEng.

Si la « Valeur de base de la vitesse du vent » n'est pas donnée dans les conditions standard indiquées antérieurement (prédéfinies dans WEng), il faut entrer les conditions particulières dans le *Paramétrage du vent géostrophique réduit* du paramétrage *Avancé* de WEng, voir 13.1.6.0.

Les Eurocodes (ou des parties) ont été adoptés, ou sont en cours d'adoption, par plusieurs pays hors de l'UE dont Singapour, l'Afrique du Sud, la Nouvelle Zélande et l'Australie en 2012.

### 13.2.1.3 Modèle d'extrapolation à hauteur de moyeu des vitesses extrêmes du vent

Une fois l'extraction des vitesses maximales du vent des mesures sites terminée, en utilisant soit la méthode des MA soit la méthode *POT-N*, il faut les extrapoler au niveau de chaque éolienne.

Le choix du modèle d'extrapolation se fait dans le cadre *Modèle d'extrapolation à hauteur de moyeu des vitesses extrêmes du vent*, voir Figure 26.

Figure 26

Si on choisit *WEng (accélérations par secteur)* ou *WAsP (accélérations par secteur)*, l'extrapolation se fait par secteur par secteur en appliquant le facteur d'accélération, calculé par *WEng* ou *WAsP*, entre la vitesse du vent à l'emplacement du mât de mesures site et le moyeu de l'éolienne.

Si on choisit *Cisaillements (extrapolations verticales par secteur uniquement)*, alors une simple extrapolation des vitesses maximales, de la hauteur des mesures à la hauteur de moyeu, est faite en utilisant uniquement le cisaillement relevé sur le mât des mesures site.

Si on choisit *Pas de modèle* alors les vitesses maximales extraites sont utilisées directement.

### 13.2.1.4 Utilisation de paramètres supplémentaires

Le contrôle des vitesses extrêmes du vent peut se faire en intégrant des paramètres supplémentaires. Leur sélection se fait dans le cadre *Utilisation de paramètres supplémentaires*, voir Figure 27.

Figure 27

#### Correction avec données LT

Cette correction ne s'applique qu'aux vitesses extrêmes du vent calculées avec la méthode *POT-N*.

La correction se fait en utilisant un indice des vitesses extrêmes du vent, établi à partir des données de long terme. Cette méthode se fonde sur des travaux publiés lors de l'EWEA 2010 [10].

Le point de départ est le constat que l'erreur d'estimation des vitesses extrêmes est principalement due :

- 1) à des mesures site de trop courte durée (erreur statistique due à l'échantillon) ;
- 2) au biais produit par la méthode d'ajustement inhérente à la méthode *POT-N*.



D'autre part, on sait que la méthode de *Maxi Annuel (MA)* avec l'utilisation des moments de probabilité pondérés ne produit pas le biais du 2).

L'indice est donc calculé de la manière suivante : on considère les données de long terme concomitantes avec les mesures sites (il faut que les données LT et les mesure aient une période commune), à partir de ces données on calcule la vitesse extrême du vent ( $u_1$ , 50ans) en utilisant la méthode *POT-N*, à partir de l'ensemble des données LT on calcule la vitesse extrême du vent ( $u_2$ , 50ans) en utilisant la méthode *Maxi Annuel (MA)*, l'indice est le rapport  $u_1/u_2$ .

La correction des vitesses extrêmes du vent calculées à partir des mesures site se fait en leur appliquant l'inverse de la valeur de l'indice.

L'indice est calculé pour chaque année des données LT. Si les mesures site couvrent plusieurs années, on calcule un deuxième indice qui représente la variation relative d'une année sur l'autre de la vitesse extrême. Ces deux indices sont présentés graphiquement, si leur évolution est identique, on peut penser que les vitesses extrêmes des données LT utilisées sont représentatives de la climatologie du site et que l'application de la correction est pertinente.

**Note** : cette correction doit être utilisée avec prudence quand la période commune ne couvre qu'une année ou quand les deux indices mentionnés antérieurement ne se suivent pas.

#### Densité de l'air aux vitesses élevées du vent

La poussée aérodynamique est proportionnelle au carré de la vitesse du vent et à la densité de l'air. Par conséquent, si la densité diminue la poussée diminue. La « norme IEC » considère la poussée de la vitesse extrême du vent à la densité standard de l'air soit  $1,225\text{kg/m}^3$ .

Quand la densité de l'air est différente, on corrige les vitesses extrêmes du vent pour que la poussée calculée avec une densité de  $1,225\text{kg/m}^3$  reste la même.

La valeur introduite doit être celle de la densité de l'air aux vitesses élevées du vent. L'approximation utilisant la densité moyenne de l'air est commune.

#### Inclure rafales 3s

Les stations d'acquisition donnent les vitesses maximales relevées sur les intervalles de 10 mn qui peuvent servir à estimer les rafales 3s, mais ces valeurs sont différentes des rafales 3s car leur période d'intégration n'est pas égale à 3s. L'alternative est d'utiliser la formule introduite par Davenport :

$$u_t = u_{10mn} (1 + k_b(t)TI)$$

où  $k_b$  est facteur pic normalisé égal à 3 pour  $t = 3\text{s}$  d'après Cook (1990) [12], où  $TI$  est la moyenne des intensités de la turbulence aux vitesses maximales extraites (l'intensité est calculée sur 10mn). La turbulence n'est pas extrapolée, par conséquent les rafales extraites des mesures site sont aussi utilisées pour chaque position d'éolienne.

#### Préréglage du paramètre k

Gumbel est un modèle asymptotique qui fait l'hypothèse que le nombre d'événements indépendants par an est infini. Cook a démontré que l'erreur résultant de cette hypothèse dépend du paramètre  $k$  de la distribution de Weibull des vitesses du vent [5]. Si  $k=1$  (distribution exponentielle) alors l'erreur = 0 quel que soit la taille de l'échantillon. Si  $k > 1$ , alors l'erreur augmente avec  $k$ .

L'erreur introduite fait que l'ajustement de Gumbel surestime les vitesses extrêmes obtenues.

Pour réduire cette erreur, la distribution de Weibull des vitesses du vent est transformée en une distribution exponentielle ( $k = 1$ ), ceci est fait en élevant toutes les vitesses à la puissance  $k$ . Ces nouvelles vitesses sont extrapolées et ajustées en utilisant le modèle de Gumbel puis, pour revenir aux vitesses extrêmes 50 ans, on extrait la racine  $k$ ème des vitesses extrêmes ainsi obtenues.

Pour une estimation générale on utilise souvent  $k = 2$ . Ici, la valeur par défaut calculée par le module est la moyenne des paramètres  $k$  à l'emplacement de chaque éolienne.

L'application du *Préréglage du paramètre k* est justifiée car elle se traduit par une réduction de 5-10% des vitesses extrêmes obtenues.

## 13.2.2 Turbulences effectives

### 13.2.2.0 Description et limites du contrôle

Ce contrôle fait aussi partie, avec celui des vitesses extrêmes du vent, des plus importants de la « norme IEC ». Les vitesses extrêmes servent à estimer les efforts maximaux que doivent supporter les éoliennes et les turbulences effectives servent à estimer la fatigue accumulée par leur structure durant leur exploitation.

Le calcul de la turbulence effective, révisé dans l'IEC 61400-1 ed.3 de 2010 [2], se fonde sur la publication [13] faite par feu Sten Frandsen de Risø/DTU. Il est plus connu sous l'appellation « Modèle de Fransen ».

La limite de la *Turbulence effective* appelée « modèle normal de turbulence » dans la « norme IEC » est calculée à partir des valeurs  $I_{ref}$  de base données dans le tableau de la Figure 1. Pour les classes A, B et C, les valeurs  $I_{ref}$  sont respectivement 0,12, 0,14 et 0,16.

La *Turbulence effective* se calcule à partir de la valeur du 9<sup>ème</sup> décile de la turbulence naturelle et doit être comparée à la limite de la « norme IEC » pour toutes les vitesses du vent couvrant un intervalle qui démarre à 60% de la vitesse produisant la puissance nominale de l'éolienne jusqu'à la vitesse de son arrêt. Le module *QUALIFICATION des SITES* exploite les courbes de puissance des objets éoliennes, à cet effet.

Un complément théorique sur le calcul de la *Turbulence effective* est donné dans l'annexe-2.

La *Turbulence effective* calculée est uniquement fonction de la vitesse du vent. Ceci est obtenu en intégrant sur 0-360° la turbulence en fonction de la direction du vent pour chaque vitesse de l'intervalle défini antérieurement. De plus, son calcul fait appel à une pondération qui utilise l'*Exposant de Wöhler*, ce paramètre rend compte de la résistance à la fatigue des matériaux utilisés. Par conséquent, la *Turbulence effective* n'est PAS une grandeur mesurable.

Avant de procéder à cette intégration la turbulence additionnelle résultant des sillages des autres éoliennes est ajoutée au 9<sup>ème</sup> décile de la turbulence naturelle.

La Figure 28, montre les limites de la *Turbulence effective* de la « norme IEC » (Normal turbulence model dans les graphiques) en fonction de la vitesse du vent pour chacune des classes.

Le graphique de droite montre l'intensité de la turbulence et celui de gauche l'écart-type de la vitesse du vent à partir duquel est calculée l'intensité de la turbulence.

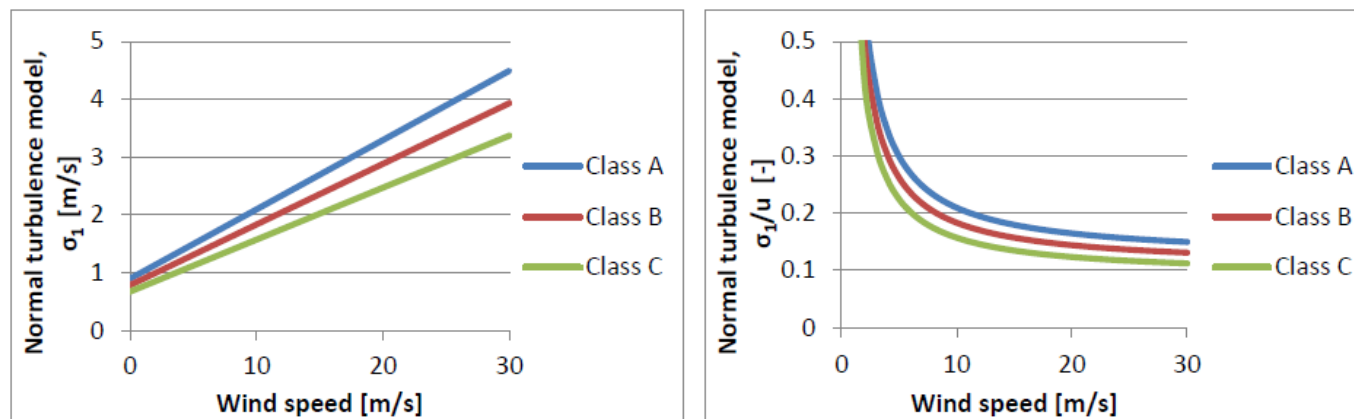


Figure 28

### 13.2.2.1 Calculs et résultats

#### Note :

Le contrôle des *Turbulences effectives* ne peut pas être lancé si, auparavant, le contrôle de la *Complexité du terrain* n'a pas été fait car les résultats de ce contrôle sont utilisés pour la *Correction de la structure de la turbulence en terrain complexe* conformément à la « norme IEC ».

La suite décrit le déroulement typique du contrôle des *Turbulences effectives*.

Onglet *Données et paramétrage*  
Voir Figure 29.

Turbulences effectives

Données et paramétrage

Nom du calcul  
Mesures site\_WAsP

Turbulence naturelle

Mesurée (utilise classes vent dont nb relevés > N) (qualité: A)

Moy.  $\sigma$  par secteur N = 10  Moy ajust. utilisée

E-type  $\sigma$  moy. pondérée N = 50  E-type ajust. utilisé  Auto  Ajust. linéaire  Ajust. robuste

Calculée avec WEng (pas de mesures) (qualité: B)

Modèle d'extrapolation de la turbulence à hauteur de moyeu

Extrapolation en utilisant:

Turbulence WEng (qualité: A)

WASP (accélération par secteur) (qualité: B)

Méthode:

Asymptotique  erreur- $\sigma$  constante  Uniforme

Pas d'extrapolation (qualité: -)

Correction structure de la turbulence en terrain complexe

Si terrain complexe ( $l_c > 0$ ) corriger avec:  Contrôle complexité  Composantes turbulence WEng  Pas de correction

Modèle Frandsen

Exposant de Wöhler 10

Correction très grands parcs  Automatique  Toutes les éoliennes  Aucune éolienne

Gestion sectorielle (arrêt machines dans les sillages quand l'espacement est faible)

Exclure effets sillages ds rayon de 0 diamètres de rotor autour des éoliennes

OK Annuler

Mesures site\_WA

Sélectionné  
Affiché

Ajouter Supprimer

Calculer

Figure 29

Le paramétrage se divise en cinq parties : choix des données de *Turbulence naturelle*, choix du *Modèle d'extrapolation de la turbulence à hauteur de moyeu*, choix de la *Correction de la structure de la turbulence en terrain complexe*, réglage du *Modèle Frandsen* et réglage de la *Gestion sectorielle*. Les explications correspondantes sont données à suite de la description du déroulement du contrôle.

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

Onglet Ajustements (tableau)

Voir Figure 30.

Mesures site	Secteur	Grandeur	2,0 m/s	3,0 m/s	4,0 m/s	5,0 m/s	6,0 m/s	7,0 m/s	8,0 m/s	9,0 m/s	10,0 m/s
Mât-1	N	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,16	0,30	0,46	0,52	0,67	0,89	0,99	1,15	1,2
		Ajustement Ecart-type ( $\sigma$ ) [m/s]	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
	NNE	Mesures Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]			0,46	0,52	0,67	0,89	0,99	1,15	1,2
		Mesures Ecart-type ( $\sigma$ ) [m/s]			0,17	0,16	0,26	0,26	0,29	0,32	0,32
	ENE	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,09	0,23	0,40	0,51	0,63	0,77	0,91	1,11	1,2
		Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	-0,12	0,07	0,37	0,43	0,53	0,70	0,97	1,20	1,3
	E	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	-0,37	-0,11	0,38	0,46	0,58	0,65	0,92	1,52	1,6
		Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,43	0,47	0,51	0,62	0,67	0,58	0,51	0,90	0,7
	ESE	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,07	0,25	0,52	0,65	0,75	0,82	1,03	1,39	1,6
		Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	-0,01	0,15	0,45	0,54	0,66	0,76	0,86	1,05	1,2
	S	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,03	0,17	0,38	0,46	0,55	0,68	0,83	1,01	1,1
		Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,01	0,15	0,40	0,46	0,55	0,63	0,80	0,95	1,0
SSO	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,19	0,31	0,39	0,50	0,63	0,79	0,95	1,08	1,1	
	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,14	0,28	0,45	0,56	0,69	0,86	1,00	1,12	1,2	
OSO	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]	0,14	0,27	0,44	0,54	0,63	0,75	0,93	1,09	1,2	
	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
O	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
ONO	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
NNO	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
	Ajustement Moyenne ( $\sigma$ ) [m/s]										
Mât-2											

Figure 30

Les données de la turbulence naturelle extraites des mesures sont traitées préalablement à leur utilisation. La moyenne et l'écart-type des mesures de turbulence sont ajustés par un modèle afin de pouvoir combler les trous existant dans les mesures et les « prolonger » pour couvrir les vitesses du vent au-delà de celles mesurées, voir 13.2.2.2.

Le tableau de l'onglet *Ajustements (tableau)* donne par secteur et pour chaque classe de vent la turbulence moyenne et son écart-type issus des mesures (*Mesures*) et la turbulence moyenne et son écart-type modélisés (*Ajustement*).

Note : les options au bas de l'onglet permettent de présenter la turbulence par son intensité (*Afficher intensités turbulence*) ou par l'écart-type des variations de la vitesse du vent (*Afficher  $\sigma$* ), cette dernière option est recommandée car l'hypothèse fondamentale du modèle Frandsen est que la fatigue des machines est proportionnelle à l'écart-type des variations de la vitesse du vent.

L'affichage de l'intensité détourne l'attention vers les faibles vitesses du vent (où les intensités sont les plus élevées) alors que les sollicitations de la structure des éoliennes sont faibles. L'affichage de l'intensité met aussi en relief des écarts insignifiants entre les mesures et le modèle aux faibles vitesses du vent.

Onglet *Ajustements (graphiques)*

Voir Figure 31.

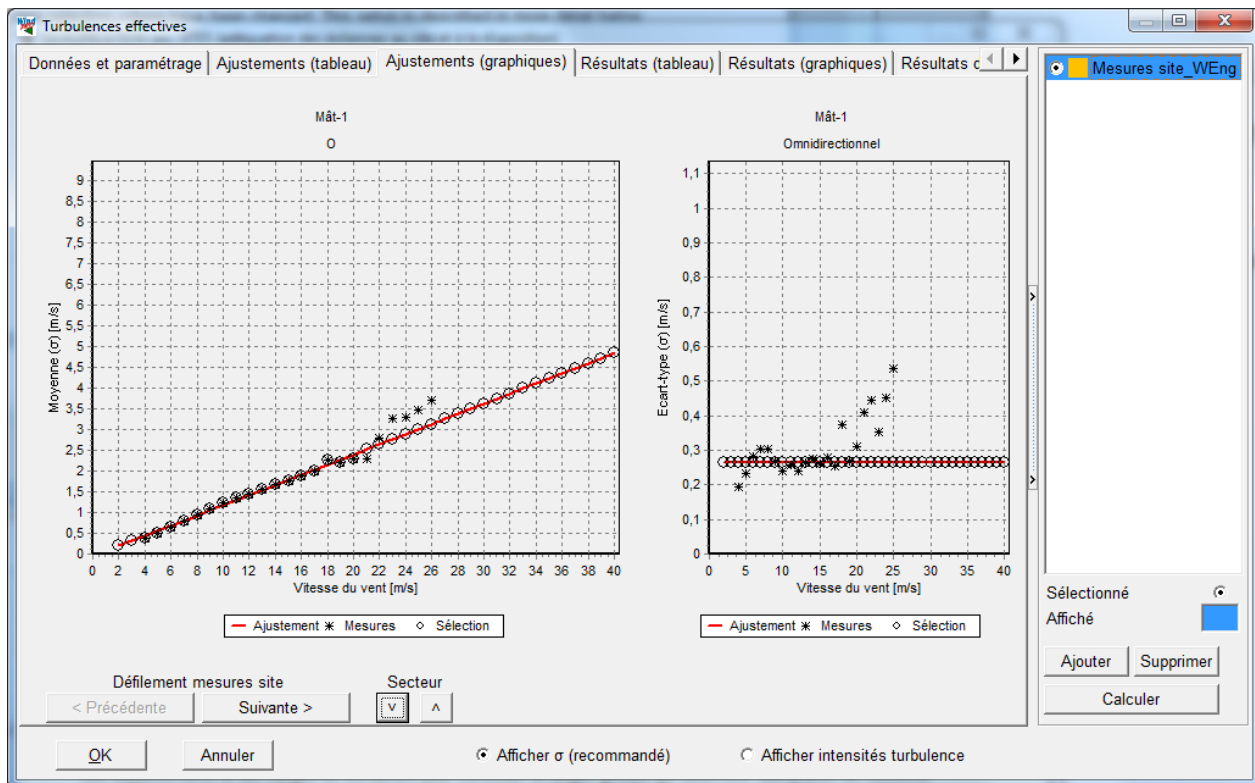


Figure 31

Cet onglet est la présentation graphique du tableau de l'onglet *Ajustements (tableau)*.

Les boutons sous *Défilement mesures site* permettent de voir la turbulence des différents mâts de mesures (si plusieurs mâts sont utilisés) et les boutons sous *Secteur* permettent de voir la turbulence dans chaque secteur.

A noter que sur les graphiques :

- les astérisques correspondent aux valeurs mesurées ;
- les cercles correspondent aux valeurs utilisées pour le contrôle ;
- la ligne rouge est la modélisation des mesures par un ajustement, linéaire en l'occurrence.

L'astérisque dans le cercle signifie que les valeurs mesurées sont utilisées.

L'astérisque hors du cercle signifie que la valeur mesurée n'est pas utilisée (car l'échantillon est trop petit, voir le paramétrage du mode de calcul de la *Turbulence naturelle* dans la suite) et c'est la valeur de l'ajustement qui est utilisée.

Pas d'astérisque signifie qu'aucune valeur n'a été mesurée et la valeur donnée par l'ajustement est utilisée.

Remarque : par défaut, l'écart-type de la turbulence utilisé (graphique de droite) est le même pour tous les secteurs. La raison est qu'habituellement une année de mesures ne suffit pas à obtenir des valeurs bien déterminées pour chaque secteur. La « norme IEC » autorise, dans une note de pied de page [2], l'utilisation la moyenne pondérée de  $\sigma_\sigma$  au lieu des valeurs par secteur pour stabiliser l'estimation.

Si l'ajustement ou les données utilisées ne sont pas satisfaisants, on peut, en cliquant sur le bouton *Ajouter*, lancer un nouveau calcul avec un autre paramétrage du mode de calcul de la *Turbulence naturelle* (voir à la suite).

Onglet *Résultats (tableau)*

Voir Figure 32.

Eoliennes	Classe	Secteur	Valeur	Equivalente	7,0 m/s	8,0 m/s	9,0 m/s	10,0 ...	11,0 ...	12,0
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,93	1,38	1,58	1,86	1,96	1,97	1,
			Limites IEC (σ) [m/s]	1,00	1,52	1,62	1,73	1,83	1,94	2,
		N	Moyenne (σ) [m/s]		0,53	0,59	0,69	0,77	0,87	0,
		NNE	Moyenne (σ) [m/s]		0,57	0,68	0,84	0,93	1,06	1,
		ENE	Moyenne (σ) [m/s]		0,60	0,84	1,05	1,21	1,45	1,
		E	Moyenne (σ) [m/s]		0,58	0,84	1,39	1,70	1,91	2,
		ESE	Moyenne (σ) [m/s]		0,55	0,47	0,84	0,73	0,77	0,
		SSE	Moyenne (σ) [m/s]		0,72	0,91	1,23	1,42	1,50	1,
		S	Moyenne (σ) [m/s]		0,72	0,82	1,00	1,15	1,40	1,
		SSO	Moyenne (σ) [m/s]		0,67	0,81	0,99	1,12	1,23	1,
		OSO	Moyenne (σ) [m/s]		0,61	0,78	0,93	1,07	1,20	1,
		O	Moyenne (σ) [m/s]		0,72	0,87	0,99	1,14	1,23	1,
		ONO	Moyenne (σ) [m/s]		0,74	0,86	0,97	1,07	1,19	1,
		NNO	Moyenne (σ) [m/s]		0,36	0,45	0,54	0,60	0,67	0,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,93	1,38	1,58	1,94	2,07	2,08	2,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,97	1,49	1,71	1,93	2,02	2,06	2,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,92	1,39	1,58	1,79	1,89	1,94	1,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,93	1,46	1,68	1,84	1,94	1,99	2,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,96	1,54	1,73	2,01	2,11	2,11	2,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,91	1,40	1,60	1,76	1,85	1,90	1,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,90	1,32	1,52	1,78	1,88	1,89	1,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,94	1,56	1,79	1,93	1,99	1,98	2,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,92	1,40	1,60	1,84	1,92	1,93	1,
Siemens SWT-2.3 IIIB			Turbulence effective, P90 (σ) [m/s]	0,95	1,46	1,67	1,91	1,98	2,01	2,

Figure 32

Le tableau de cet onglet présente, par éolienne, la valeur de la *Turbulence effective* calculée pour chaque classe de vitesse du vent de l'intervalle défini dans la « norme IEC ».

Cet intervalle est établi à partir de la vitesse du vent donnant la puissance nominale de l'éolienne (voir 13.2.2.0) dont la valeur est extraite de la courbe de puissance de l'objet éolienne.

Les valeurs dépassant les limites de la « norme IEC » sont affichées sur fond jaune (*Attention*) ou rouge (*Critique*). Elles sont affichées sur fond jaune, quand les dépassements ne sont pas jugés critiques et qu'ils sont compensés par des marges à d'autres vitesses du vent et elles sont affichées sur un fond rouge quand le cumul des dépassements est jugé critique.

Pour chaque éolienne :

La première ligne présente la *Turbulence effective* par classe de vent et la deuxième ligne présente la limite de la « norme IEC » correspondante.

Dans la colonne *Equivalente*, la valeur de la deuxième ligne est toujours égale à 1, c'est un indice formé à partir des *Limites IEC* de chaque classe de vent et la valeur de la première ligne est un indice calculé de la même manière à partir de la *Turbulence effective* de chaque classe de vent. Quand ce dernier est égal ou supérieur à 1 alors les dépassements sont affichés sur fond rouge (*Critique*).

Les lignes suivantes détaillent les résultats par secteur.

## Onglet Résultats (graphiques)

Voir Figure 33.

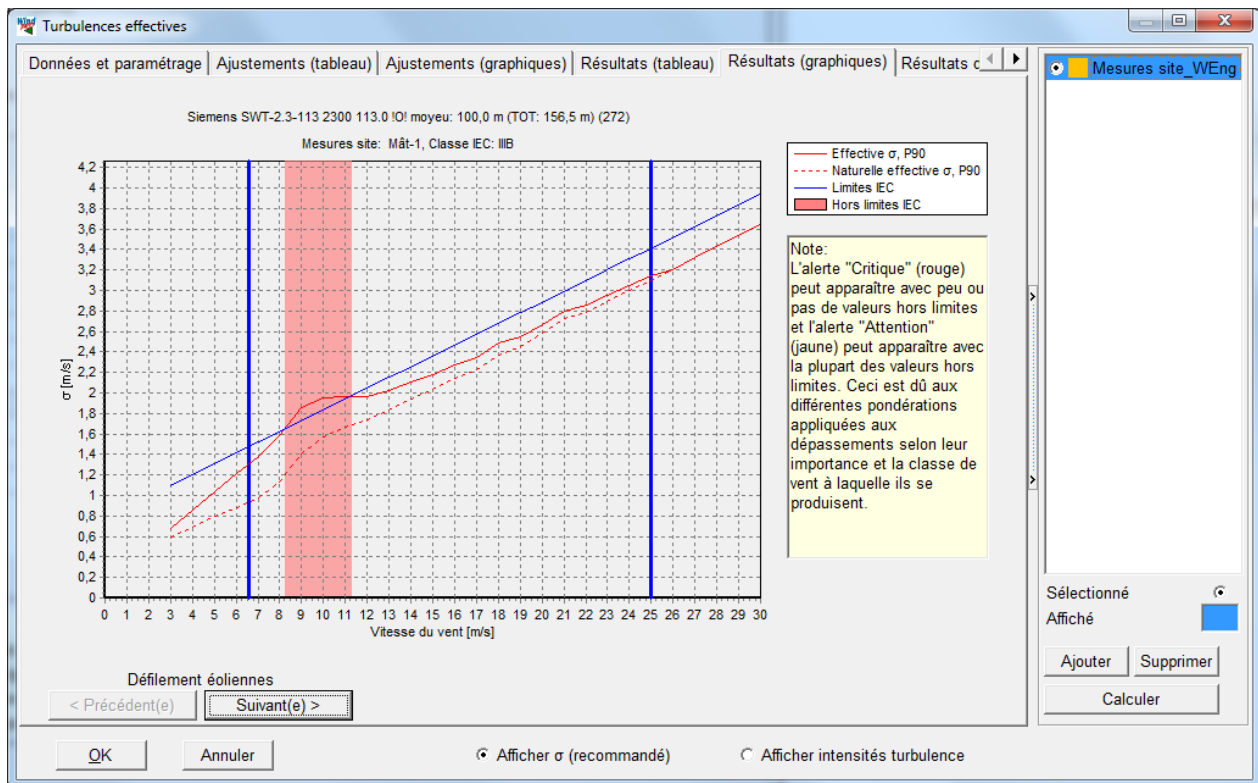


Figure 33

Cet onglet, présente sous forme graphique la *Turbulence effective* calculée en fonction de la classe du vent. Les boutons sous *Défilement éoliennes* permettent d'afficher le graphique pour chacune des éoliennes. Les valeurs de la *Turbulence effective* dépassant les limites dans l'intervalle de contrôle de la « norme IEC » sont signalées par une coloration rose.

La *Turbulence naturelle effective* est tracée en pointillés rouges. L'écart par rapport à la *Turbulence effective*, ligne rouge, est la turbulence additionnelle résultant des sillages des autres éoliennes. Cet écart est plus important jusqu'à 12-13 m/s car au-delà le coefficient de trainée diminue rapidement, sur la plupart des éoliennes. La diminution du coefficient de trainée entraîne une diminution des turbulences produites par le sillage.

Onglet Résultats détaillés (graphiques)

Voir Figure 34.

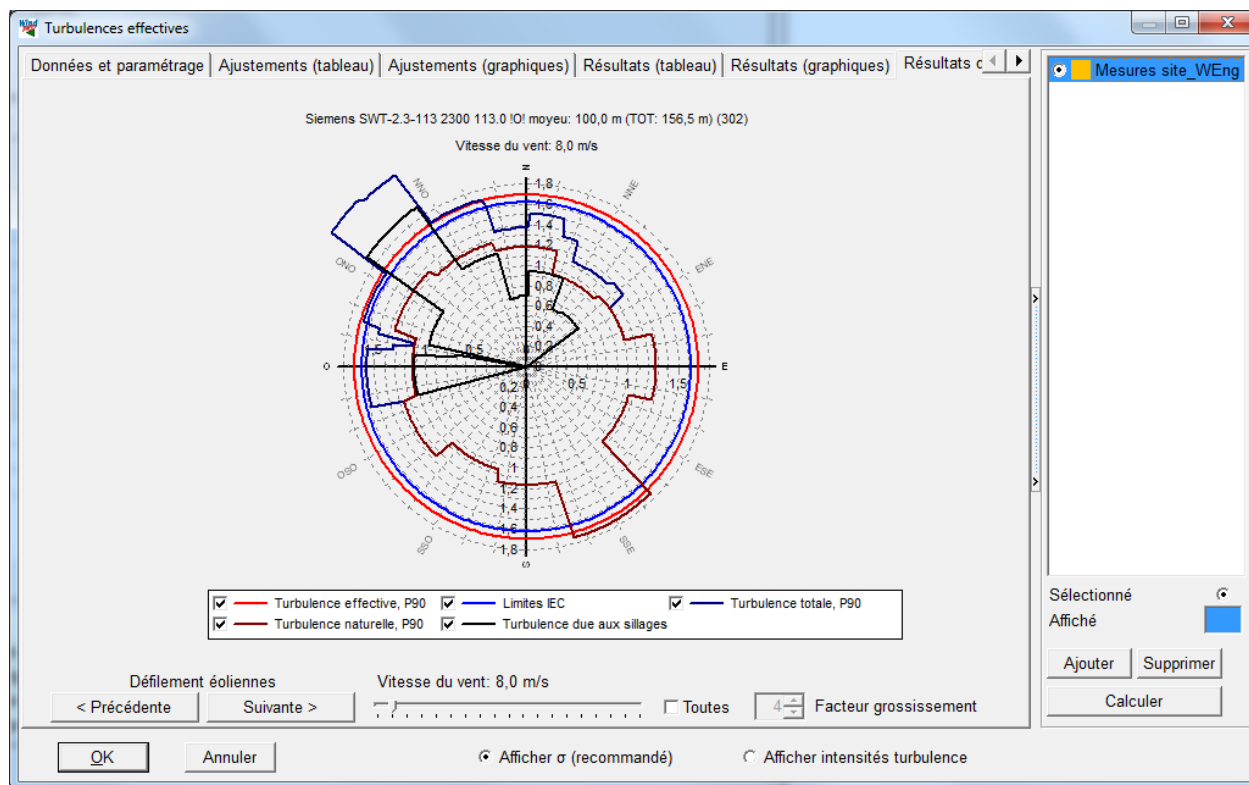


Figure 34

Cet onglet permet de visualiser la *Turbulence naturelle* et la *Turbulence due aux sillages* à partir desquelles est calculée la *Turbulence effective*. Pour ne pas afficher une turbulence, il suffit de la décocher dans le cadre sous le graphique. En faisant glisser le curseur *Vitesse du vent* on peut examiner l'évolution des turbulences en fonctions des vitesses du vent. Les boutons sous *Défilement éoliennes* permettent d'afficher le graphique des turbulences pour chacune des éoliennes.

En cochant l'option *Toutes*, la disposition du parc est affichée avec à l'emplacement de chaque éolienne le graphique des turbulences correspondant. Si on ne conserve que l'affichage de la *Turbulence due aux sillages* cette option permet de visualiser comment les machines interfèrent les unes sur les autres.

Ces graphiques permettent de comprendre l'origine des problèmes de turbulence : turbulence naturelle, turbulence due aux sillages, disposition des éoliennes, secteurs à problèmes et de prendre les actions correctives adéquates.

**13.2.2.2 Paramétrage du calcul de la turbulence naturelle**

La turbulence naturelle du site est la donnée de départ pour calculer les *Turbulences effectives*.

Elle peut être extraite des mesures site en cochant l'option *Mesurée* ou calculée avec WEng en cochant l'option *Calculée avec WEng*, voir Figure 35.

Turbulence naturelle	
<input checked="" type="radio"/> Mesurée (utilise classes vent dont nb relevés > N)	(qualité: A)
Moy. $\sigma$ par secteur	N = 10 <input type="checkbox"/> Moy ajust. utilisée
E-type $\sigma$ moy. pondérée	N = 50 <input checked="" type="checkbox"/> E-type ajust. utilisé
<input type="radio"/> Calculée avec WEng (pas de mesures)	(qualité: B)
	<input checked="" type="radio"/> Auto <input type="radio"/> Ajust. linéaire <input type="radio"/> Ajust. robuste

Figure 35



### Turbulence naturelle extraite des mesures site

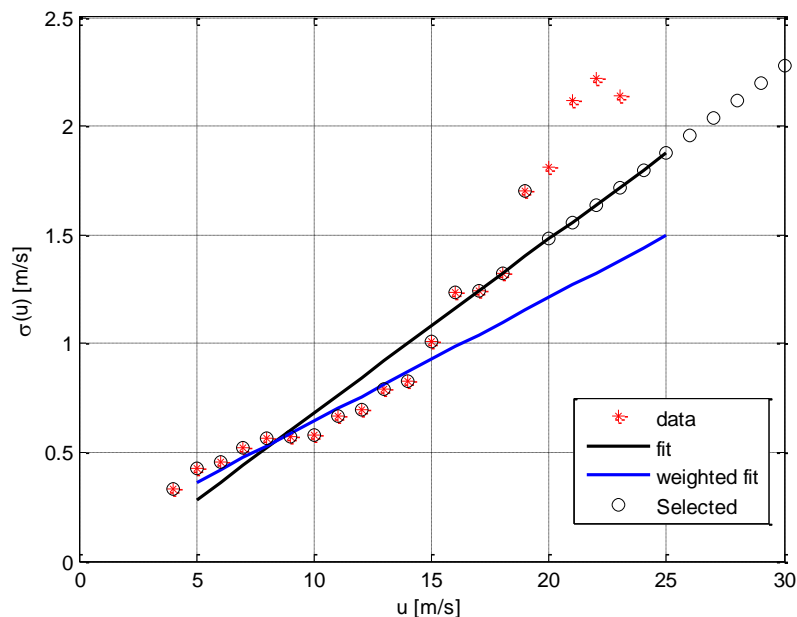
Les données de la turbulence naturelle extraites des mesures doivent être traitées préalablement à leur utilisation ultérieure dans les calculs, car il y a toujours des trous, des valeurs disparates et d'autres anomalies. Le traitement se fait en deux étapes : d'abord la sélection des données qui seront utilisées en utilisant des critères puis leur modélisation en utilisant un ajustement (linéaire par exemple) qui servira à remplacer les valeurs douteuses et à fournir les valeurs manquantes.

### **Modélisation de la turbulence naturelle moyenne $\sigma$**

*Moy.  $\sigma$* , ce menu se rapporte à la valeur moyenne, le choix *par secteur* fait que l'on va travailler secteur par secteur avec les valeurs moyennes correspondantes, le choix *moy. pondérée* fait que l'on va travailler avec une valeur moyenne unique issue de la moyenne pondérée des moyennes de chaque secteur. Il est vivement recommandé d'utiliser le premier choix qui est proposé par défaut. Le deuxième choix doit être réservé à un usage « expérimental » ou pour obtenir un modèle plus robuste quand les mesures site sont « problématiques » car faites sur une durée trop courte par exemple.

*N =*, ce champ permet d'exclure du calcul de l'ajustement servant à modéliser la valeur moyenne de la turbulence naturelle les classes du vent avec trop peu de valeurs. Seules les classes du vent comportant un nombre de mesures supérieur à N seront retenues. La valeur moyenne de la turbulence donnée par l'ajustement sera ensuite utilisée pour les classes du vent dont le nombre de mesure est inférieur à N.

La valeur de N proposée par défaut a été choisie après l'expérimentation de cette méthode sur de nombreux sites. L'ajustement est réalisé avec la méthode des « moindres carrés ». Aucune pondération en fonction du nombre de mesures dans chaque classe du vent n'est appliquée, la conséquence est une surpondération aux hautes vitesses du vent car leur fréquence est inférieure à celle des basses vitesses. La raison de ce choix est que les efforts sur les éoliennes sont plus importants aux hautes vitesses du vent. D'autre part, l'utilisation d'une telle pondération masquerait la suraccentuation de la turbulence aux hautes vitesses du vent dans les sites en forêt, offshore et côtiers conduisant à une sous-estimation de la turbulence naturelle aux hautes vitesses du vent, voir illustration Figure 36.



Les croix rouges sont les valeurs mesurées de la turbulence moyenne naturelle représentée ici par l'écart-type de la variation de la vitesse du vent  $\sigma(u)$  en fonction de la classe du vent  $u$ .

La droite noire est l'ajustement linéaire sans pondération des valeurs mesurées qui est utilisé par le module *QUALIFICATION des SITES*.

La droite bleu est l'ajustement linéaire en appliquant aux valeurs mesurées une pondération proportionnelle à leur fréquence. On voit que cette modélisation de la turbulence moyenne naturelle sous-estime fortement la réalité, à partir de 15 m/s.

Figure 36

*Moy ajust. utilisée*, si cette option est cochée, les valeurs moyennes de la turbulence mesurée ne sont pas utilisées, même si leur nombre dans les classes est supérieur à N, elles sont substituées par les valeurs de l'ajustement. Le choix de cette option est recommandé quand les mesures sont très « bruitées » ou oscillantes, il permet de rendre la modélisation plus robuste dans ces cas.

### **Modélisation de l'écart-type de la turbulence naturelle $\sigma_\sigma$**

On retrouve les mêmes options que pour la modélisation de la turbulence moyenne, par contre les propositions par défaut sont différentes.

Par défaut, on ne va pas travailler *par secteur* mais avec la *moy. pondérée*, comme l'autorise la « norme IEC » [2], l'utilisation la moyenne pondérée de  $\sigma_\sigma$  donne des résultats beaucoup plus stable.

Par défaut, la valeur de N = 50 afin de rendre plus robuste la modélisation de  $\sigma_\sigma$ , mais nous avons constaté que sur certains sites avec de mesures couvrant une seule année ce n'est pas suffisant, par conséquent des options supplémentaires sont proposées :

- *Auto* : si cette option est choisie un simple ajustement linéaire est utilisé quand  $r^2 > 0,8$ . Si  $r^2 < 0,8$ , alors on préfère utiliser la valeur médiane de l'échantillon qui est beaucoup moins sensible aux valeurs extrêmes.
- *Ajust. linéaire* : force l'utilisation de l'ajustement linéaire même si  $r^2 < 0,8$ .
- *Ajust. robuste* : force l'utilisation de la médiane de l'échantillon même si  $r^2 > 0,8$ .

#### Turbulence naturelle calculée avec WEng (pas de mesures)

Si des mesures sur site n'ont pas été réalisées, WEng permet de calculer la turbulence ( $TI_{weng}$ ).

A noter que WEng n'intègre pas l'accroissement de la turbulence dû aux courants thermiques et qu'il ne calcule pas son écart-type. A la place, dans l'outil WAT [14] utilisé par WEng, Risø/DTU a choisi d'utiliser les paramètres de la « norme IEC » et le 9<sup>ème</sup> décile de la turbulence est calculé pour chaque secteur de chaque éolienne à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_{90} = TI_{Weng} u_{HH} + 7.47 TI_{Weng}$$

Le résultat obtenu est pessimiste pour la plupart des sites. Un travail est actuellement en cours pour essayer de mettre en place une correction de l'équation dans le module *QUALIFICATION des SITES*. Mais pour le moment, le module est utilisé conformément à la méthode Risø/DTU [14, 15].

#### 13.2.2.3 Modèle d'extrapolation de la turbulence à hauteur de moyeu

La turbulence mesurée est uniquement vraie à l'emplacement et à la hauteur des mesures. Elle peut être nettement différente aux emplacements et à la hauteur des éoliennes.

Le module *QUALIFICATION des SITES* propose plusieurs modèles permettant de calculer la turbulence au niveau de chaque éolienne à partir de la turbulence mesurée. Si les conditions des mesures sont totalement représentatives des conditions au niveau de chaque éolienne, il est possible d'utiliser directement la turbulence mesurée, voir Figure 37.

Modèle d'extrapolation de la turbulence à hauteur de moyeu

- Extrapolation en utilisant:
  - Turbulence WEng (qualité: A)
  - WAsP (accélération par secteur) (qualité: B)
- Méthode:
  - Asymptotique
  - erreur-σ constante
  - Uniforme
- Pas d'extrapolation (qualité: -)

Figure 37

L'extrapolation des valeurs de la turbulence peut se faire, par secteur, à partir des accélérations données par WEng ou des accélérations par secteur données par WAsP et à partir des différentes hypothèses suivantes :

- 1) *Asymptotique*
- 2) *Erreur-σ constante*
- 3) *Uniforme*

#### Turbulence WEng + Asymptotique

Cette méthode se fonde sur les deux hypothèses suivantes :

- a) WEng en tant que modèle utilisant une stabilité atmosphérique neutre rend bien compte de la variation de la turbulence produite par des causes mécaniques. Par conséquent, les ratios des turbulences calculés par WEng doivent être proche de ceux mesurés aux plus hautes vitesses du vent, soit :

$$\sigma_{mast}^t(u, \theta) / \sigma_{WTG}^t(u, \theta) \rightarrow \sigma_{mast}^p(u, \theta) / \sigma_{WTG}^p(u, \theta) \quad \text{for } u \rightarrow \infty$$

- b) Que la turbulence aux très faibles du vent est presque entièrement produite par des causes thermiques, soit :

$$\sigma_{mast}^t(u, \theta) / \sigma_{WTG}^t(u, \theta) \rightarrow 1 \quad \text{for } u \rightarrow 0$$

L'exposant  $t$  indique qu'il s'agit de la turbulence réelle et l'exposant  $p$  de la turbulence calculée par WEng.

Le facteur d'extrapolation résultant est une fonction de la direction et de la vitesse du vent.

Turbulence WEng + Erreur- $\sigma$  constante

Le modèle micro-échelle utilisé par WEng ignore la partie de la turbulence engendrée par des phénomènes à plus grande échelle ainsi que la partie due aux effets thermiques. Cette méthode se fonde sur l'hypothèse que l'erreur résultante est constante sur toute l'étendue du site, soit :

$$\sigma_{WTG}^t(u, \theta) - \sigma_{WTG}^p(u, \theta) = \sigma_{mast}^t(u/c, \theta) - \sigma_{mast}^p(u/c, \theta)$$

avec  $u = u_{WTG}$  = vitesse du vent à l'éolienne

et  $c = u_{WTG}/u_{mast}$  = accélération de la vitesse de vent, calculée par WEng entre l'emplacement des mesures et l'éolienne.

Le facteur d'extrapolation est aussi une fonction de la direction et de la vitesse du vent.

Turbulence WEng + Uniforme

Cette méthode se fonde sur l'hypothèse simplifiée suivante : le rapport entre les turbulences réelles éolienne/mesures est égal au rapport entre les turbulences éolienne/mesures calculé par WEng pour toutes les vitesses du vent dans un même secteur soit :

$$\sigma_{WTG}^t(u, \theta)/\sigma_{mast}^t(u, \theta) = \sigma_{WTG}^p(u, \theta)/\sigma_{mast}^p(u, \theta)$$

L'exposant  $t$  indique qu'il s'agit de la turbulence réelle et l'exposant  $p$  de la turbulence calculée par WEng.

Le facteur d'extrapolation résultant est uniquement fonction de la direction du vent et n'utilise aucune accélération. Malgré cette simplification cette méthode est plutôt robuste.

WAsP + Erreur- $\sigma$  constante

Cette méthode est une version simplifiée de celle utilisée avec WEng étant donné que WAsP ne calcule pas la turbulence. En reprenant l'équation précédente et en supprimant la turbulence calculée avec WEng on obtient :

$$\sigma_{WTG}^t(u, \theta) = \sigma_{mast}^t(u/c, \theta)$$

Cela revient à considérer que la valeur  $\sigma$  de la turbulence mesurée au mât de mesures, pour une vitesse et une direction du vent données, sera la même en tout point du site pour ces mêmes vitesse et direction du vent. Les changements de rugosité et de relief modifient la vitesse du vent et détermineront par conséquent la variation de la turbulence d'un point à un autre du site.

WAsP + Uniforme

Cette méthode se fonde sur l'hypothèse simplifiée suivante : le rapport entre les turbulences éolienne/mesures est égal au rapport entre les vitesses du vent éolienne/mesures soit :

$$\sigma_{WTG}^t(u, \theta) = 1/c \sigma_{mast}^t(u, \theta)$$

avec  $c = u_{WTG}/u_{mast}$  = accélération de la vitesse du vent, calculée par WAsP entre l'emplacement des mesures et l'éolienne = facteur d'extrapolation.

Pas d'extrapolation

En utilisant cette dernière option, on fait l'hypothèse que les valeurs de la turbulence relevées sur le mât de mesures sont valables en tout point du site soit :

$$\sigma_{WTG}^t(u, \theta) = \sigma_{mast}^t(u, \theta)$$

Cette méthode ne doit être utilisée que sur les petits sites sans variation sensible du terrain entre le point des mesures et les éoliennes ou si les autres méthodes ne donnent pas des résultats pertinents. En offshore, cette méthode peut être la mieux adaptée si le mât de mesures est configuré de façon adéquate.

**13.2.2.4 Correction de la structure de la turbulence**

La « norme IEC » indique que si une éolienne est implantée sur un terrain complexe ou en partie complexe, c'est-à-dire que le résultat de contrôle de *Complexité du terrain*  $I_c > 0$ , alors les valeurs de la turbulence doivent être corrigées car les anémomètres à coupelles ne rendent pas compte de la composante verticale de la turbulence, or en terrain complexe, la composante verticale contient une part non négligeable de l'énergie de la turbulence.

A cet effet, la « norme IEC » a introduit un facteur de correction  $C_{CT}$  appelé facteur de *Correction de la structure de la turbulence*.

Trois options sont proposées pour effectuer la correction, voir Figure 38.

Correction structure de la turbulence en terrain complexe

Si terrain complexe (Ic>0) corriger avec:  Contrôle complexité  Composantes turbulence WEng  Pas de correction

Figure 38

#### Contrôle de complexité

La « norme IEC » donne la formule de calcul donnant  $C_{CT}$  à partir de  $I_c$  :

$$C_{CT} = 1 + 0.15I_c$$

La « norme IEC » [2] indique que cette formule doit être utilisée quand on ne dispose pas de modélisation ou de mesures donnant les trois composantes de la turbulence.

On a constaté sur des sites complexes, que cette option donne des résultats très pessimistes par comparaison aux résultats obtenus à partir de modélisations. La même chose se produit lorsqu'on utilise une modélisation linéarisée, telle que celle mise œuvre par WEng, qui surestime les angles des écoulements et qui, par conséquent, exagère le transfert de l'énergie de la composante longitudinale de la turbulence vers ses composantes verticale et transverse.

#### Composantes turbulence WEng

La « norme IEC » donne la formule de calcul donnant  $C_{CT}$  à partir des trois composantes de la turbulence quand elles sont disponibles :

$$C_{CT} = \frac{\sqrt{1 + (\sigma_w/\sigma_u)^2 + (\sigma_v/\sigma_u)^2}}{1.375}$$

Où  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  et  $\sigma_w$  sont respectivement les trois composantes longitudinale, verticale et transverse de la turbulence. Quand l'option *Composantes turbulence WEng* est choisie, les trois composantes de la turbulence sont calculées à l'emplacement de chaque éolienne.

Cette option est cochée par défaut si un calcul WEng a été fait préalablement, voir 13.1.6.

La présente version du module *QUALIFICATION des SITES* ne permet d'utiliser des mesures avec les trois composantes de la turbulence.

#### Pas de correction

Cette option doit être choisie uniquement quand la *Complexité du terrain*  $I_c = 0$  à tous les emplacements d'éolienne. La seule exception est quand la turbulence a été calculée avec WEng, dans ce cas, cette option est cochée par défaut car WEng fournit la composante longitudinale et non les composantes horizontales comme un anémomètre à coupelles. Ce choix est conforme à la manière de calculer de Risø/DTU avec son logiciel WAT.

### 13.2.2.5 Modèle Frandsen

Le modèle de turbulence effective Frandsen est fondamental dans la « norme IEC », il est décrit en détail dans l'annexe D de la norme [1,2]. Une présentation résumée du modèle est donnée dans l'annexe-2 de ce manuel.

En bref, le modèle Frandsen est formé plusieurs composants. Le premier est un modèle capable de décrire la turbulence en aval de l'éolienne en fonction de son coefficient de trainée et de la vitesse du vent. Le deuxième composant est un modèle permettant de calculer la *Turbulence totale*, résultant de la combinaison de la *Turbulence naturelle* et de la *Turbulence due aux sillages*, pour chaque direction et chaque classe de vent. Le troisième composant est un calcul intégral sur 0-360° de la *Turbulence totale* pondérée par sa fréquence sur la direction considérée et par un élément non-linéaire se rapportant à la fatigue des matériaux. Ce dernier nécessite l'introduction d'un paramètre appelé l'exposant de Wöhler qui est propre à chaque matériau. Cette intégrale est calculée pour chaque classe de la vitesse du vent et au final on obtient la *Turbulence effective* en fonction de la vitesse du vent.

Les options de paramétrage du modèle, voir Figure 39, sont décrites à la suite.

Modèle Frandsen

Exposant de Wöhler

Correction très grands parcs  Automatique  Toutes les éoliennes  Aucune éolienne

Figure 39

Exposant de Wöhler

C'est le paramètre se rapportant à la fatigue des matériaux qui est utilisé pour la pondération mentionnée antérieurement dans le calcul de la *Turbulence effective*.

Habituellement sa valeur est égale à 10, elle correspond à la fibre de verre renforcée utilisée pour la fabrication des pales des éoliennes. Une valeur de l'ordre de 3 correspond à l'acier utilisé pour la fabrication du mât et du moyeu de l'éolienne. L'utilisation de la valeur 10 résulte en une augmentation de la marge des parties de l'éolienne fabriquées avec des matériaux dont la valeur de l'exposant de Wöhler est plus petite.

**13.2.2.6 Gestion sectorielle**

La présente version du module *QUALIFICATION des SITES* inclut une méthode basique qui permet d'ignorer les effets des sillages des éoliennes voisines qui se trouvent à une distance inférieure à une certaine valeur car elles ont été arrêtées par le système de gestion. La distance doit être exprimée en diamètres de rotor, voir Figure 40.

Quand dans le sillage d'une éolienne se trouve une autre éolienne à une distance de moins de 3 diamètres de rotor, la plupart des fabricants préconisent son arrêt. Avec le module *QUALIFICATION des SITES*, il est très simple de prendre en compte cette préconisation et de voir ses effets.

Gestion sectorielle (arrêt machines dans les sillages quand l'espace est faible)

Exclure effets sillages ds rayon de  diamètres de rotor autour des éoliennes

Figure 40

### 13.2.3 Distributions des vitesses du vent

#### 13.2.3.0 Description et limites du contrôle

Ce contrôle effectue la comparaison de la distribution des vitesses au niveau de chaque éolienne avec le gabarit défini dans la « norme IEC ».

Le gabarit défini dans la « norme IEC » est une distribution de Weibull dont le paramètre  $k=2$  et dont la vitesse moyenne du vent est égale à 20% de  $V_{ref}$  de la classe considérée, soit 10m/s, 8,5m/s et 7,5m/s respectivement pour les classes I, II et III (Les  $V_{ref}$  sont données dans le tableau 1 de l'IEC 61400-1 ed. 3, voir 13.0.0).

Le contrôle doit être effectué dans l'intervalle compris entre 20% et 40% de  $V_{ref}$  soit entre la vitesse moyenne et deux fois la vitesse moyenne du gabarit.

La « norme IEC » indique que ce contrôle doit être fait en utilisant des distributions des vitesses du vent représentatives du long terme. A cet effet, le module *QUALIFICATION des SITES* permet :

- 1) d'utiliser des statistiques éoliennes produites avec le module MCP, pour cela choisir *WAsP avec Stat. Eolienne(s) corrigée(s) long terme* dans l'onglet *Principal*.
- 2) d'utiliser directement les mesures site et de les corriger dans l'onglet *Correction long terme*, voir 13.1.4.
- 3) d'utiliser directement les mesures sites si elles sont représentatives du long terme ; cette pratique n'est pas rare quand les mesure couvrent des périodes supérieures à trois ans.

#### 13.2.3.1 Calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

##### Onglet *Données et paramétrage*

Le paramétrage est réduit aux trois options montrées dans la Figure 41.

L'option *Weibulls calculés avec WAsP, par secteur* est cochée par défaut, car le calcul des distributions des vitesses du vent au niveau de chaque éolienne avec WAsP est la pratique la plus habituelle.

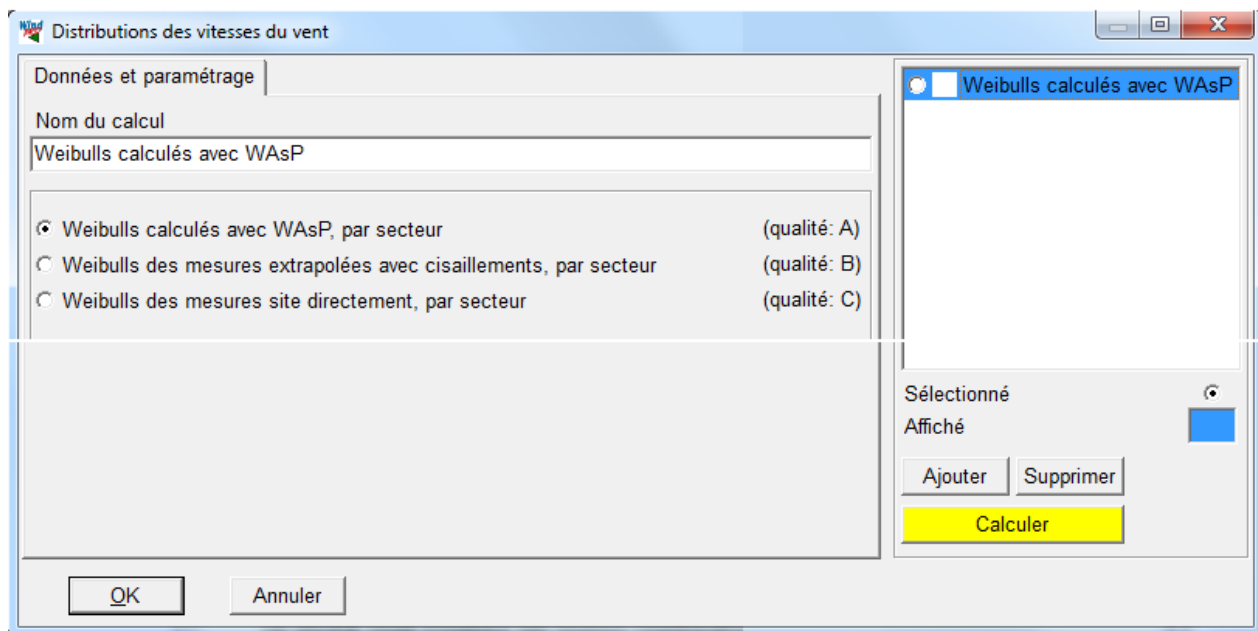


Figure 41

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

### Onglet Résultats (tableau)

Le tableau de cet onglet, voir Figure 42, montre les résultats par éolienne et par classe de vent de l'intervalle de contrôle. Selon que, globalement, le résultat du contrôle est *Critique* ou *Attention*, les résultats hors limites sont présentés sur un fond rouge ou sur un fond orange.

Pour chaque éolienne, la première ligne montre la fréquence calculée du vent dans chacune des classes de l'intervalle et la seconde ligne montre la limite correspondante du gabarit IEC. En cliquant sur le « + » les fréquences sont détaillées par secteur.

Éoliennes	Objet Météo	Classe	Direction [Deg]	Fréquence [%]	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s	13 m/s	
Siemens SWT-2.3 Mât-1		IIIB	Résultat [%]	100,0	11,8	10,1	8,0	5,9	4,3	3,1	
			IEC max [%]	100,0	9,1	8,1	6,9	5,7	4,5	3,4	
			Weibull	0	4,4	8,0	6,7	5,4	4,2	3,2	2,4
				30	5,4	9,8	8,4	6,7	5,1	3,7	2,6
				60	7,3	13,0	9,9	6,5	3,7	1,8	0,8
				90	6,8	15,3	10,0	4,9	1,8	0,5	0,1
				120	6,6	16,9	12,1	6,7	2,7	0,8	0,1
				150	7,3	15,2	11,5	7,1	3,6	1,4	0,4
				180	10,2	13,5	11,9	9,3	6,5	4,0	2,2
				210	13,4	11,9	11,4	10,1	8,3	6,3	4,4
	240	14,0	10,5	10,4	9,8	8,7	7,2	5,6			
	270	12,6	9,5	9,3	8,7	7,8	6,6	5,4			
	300	7,4	9,0	8,2	7,2	6,1	5,0	4,0			
	330	4,6	8,2	7,1	6,0	4,9	3,8	3,0			
Siemens SWT-2.3 Mât-2		IIIB	Résultat [%]	100,0	11,6	9,8	7,6	5,6	4,0	2,8	
Siemens SWT-2.3 Mât-1		IIIB	Résultat [%]	100,0	11,8	10,0	7,8	5,8	4,2	3,0	
Siemens SWT-2.3 Mât-2		IIIB	Résultat [%]	100,0	11,7	9,8	7,6	5,6	4,0	2,8	
Siemens SWT-2.3 Mât-1		IIIB	Résultat [%]	100,0	11,8	10,0	7,8	5,8	4,2	3,0	
Siemens SWT-2.3 Mât-1		IIIB	Résultat [%]	100,0	11,9	10,1	7,9	5,8	4,2	2,9	

Figure 42

### Onglet Résultats (graphiques)

Cet onglet présente sous forme graphique le gabarit IEC et la distribution des vitesses du vent calculée. Le gabarit IEC (*Limites IEC*) est tracé en bleu et l'intervalle de contrôle est délimité par les lignes verticales bleues également. Les classes vent où la distribution est hors limite sont signalées par une coloration rose. Les boutons sous *Défilement éolienne* permettent d'afficher le graphique pour chacune des éoliennes.

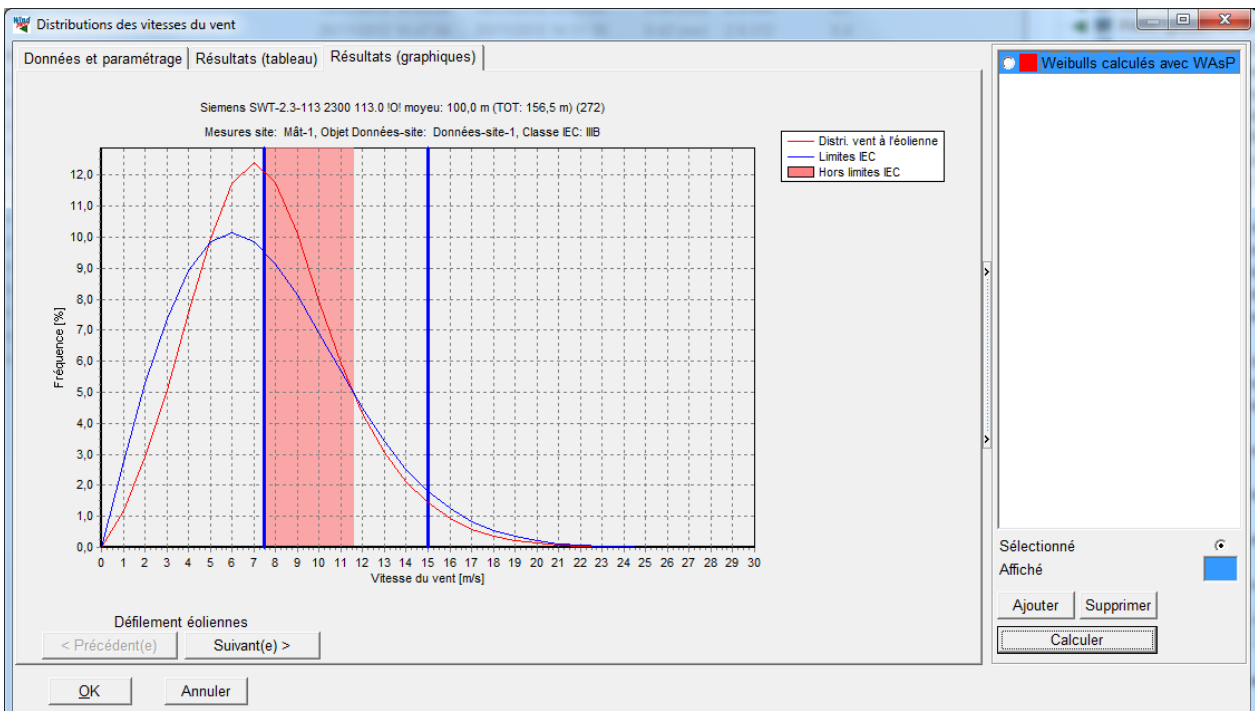


Figure 43

### 13.2.3.2 Paramétrages du calcul

L'option la plus habituelle est le calcul des distributions des vitesses du vent par secteur, pour chaque éolienne, avec WAsP. Les deux autres options ne doivent être utilisées que si les mesures site sont représentative des conditions de vent à l'emplacement des éoliennes.

On doit se rappeler que le modèle WAsP donne des résultats biaisés quand les pentes du terrain dépassent un certain seuil. Les accélérations de la vitesse du vent produites par le relief sont alors surestimées.

#### Weibulls calculés avec WAsP, par secteur

On calcule, avec WAsP, la distribution des vitesses du vent dans chaque secteur de l'éolienne, puis un poids proportionnel à la fréquence du vent dans le secteur est affecté à la distribution, ensuite ces distributions sont combinées pour produire la distribution omnidirectionnelle qui est comparée au gabarit IEC. A noter que cette distribution n'est pas une distribution de Weibull et qu'elle peut, par conséquent, présenter plusieurs maxima.

#### Weibulls des mesures extrapolés avec les cisaillements, par secteur

On utilise les vitesses de la *Hauteur principale* des mesures site (indiquée dans l'onglet *Données de vent*, voir 13.1.1). Pour chaque secteur, le paramètre A de la distribution de Weibull ajustant ces vitesses est extrapolé à hauteur de moyeu de l'éolienne en utilisant le cisaillement mesuré sur ce même secteur, puis un poids proportionnel à la fréquence du vent dans le secteur est affecté à la distribution. Ensuite, ces distributions sont combinées pour produire la distribution omnidirectionnelle au niveau de l'éolienne qui est comparée au gabarit IEC.

Faute de licence WAsP, on peut utiliser cette méthode qui fait l'hypothèse que les vitesses du vent et que les cisaillements sont les mêmes aux emplacements des éoliennes et à l'emplacement du mât de mesures ce qui faux si le relief n'est pas plat et si la rugosité n'est pas uniforme.

#### Weibulls des mesures site directement par secteur

Cette méthode est la même que la précédente, mais sans l'étape d'extrapolation à hauteur de moyeu en utilisant les cisaillements. Cette méthode est valable uniquement si les caractéristiques du vent sont identiques aux emplacements des éoliennes et à l'emplacement du mât de mesures et si les mesures ont été faites à hauteur de moyeu des éoliennes.



### 13.2.4 Angles des écoulements

Ce contrôle examine les angles de l'écoulement du vent, autour de chaque éolienne, repère le secteur dont la valeur absolue de l'angle est la plus élevée et la compare à la « norme IEC »

#### 13.2.4.0 Description et limites du contrôle

La « norme IEC » indique les angles de l'écoulement doivent rester compris entre  $-8^{\circ}$  et  $+8^{\circ}$ .

La « norme IEC » précise que le petit disque (rayon = 5 hauteurs de moyeu) du contrôle de la *Complexité du terrain* peut être utilisé pour le contrôle des *Angles des écoulements*. Le module *QUALIFICATION des SITES* utilise cette possibilité qui donne des résultats comparables à ceux obtenus avec des outils d'analyse plus avancés comme WEng.

#### 13.2.4.1 Calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

##### Onglet Données et paramétrage

Seules deux options de paramétrage sont proposées. Si un calcul WEng a été effectué préalablement, voir 13.1.6, l'option faisant appel à WEng est cochée par défaut, voir Figure 44.

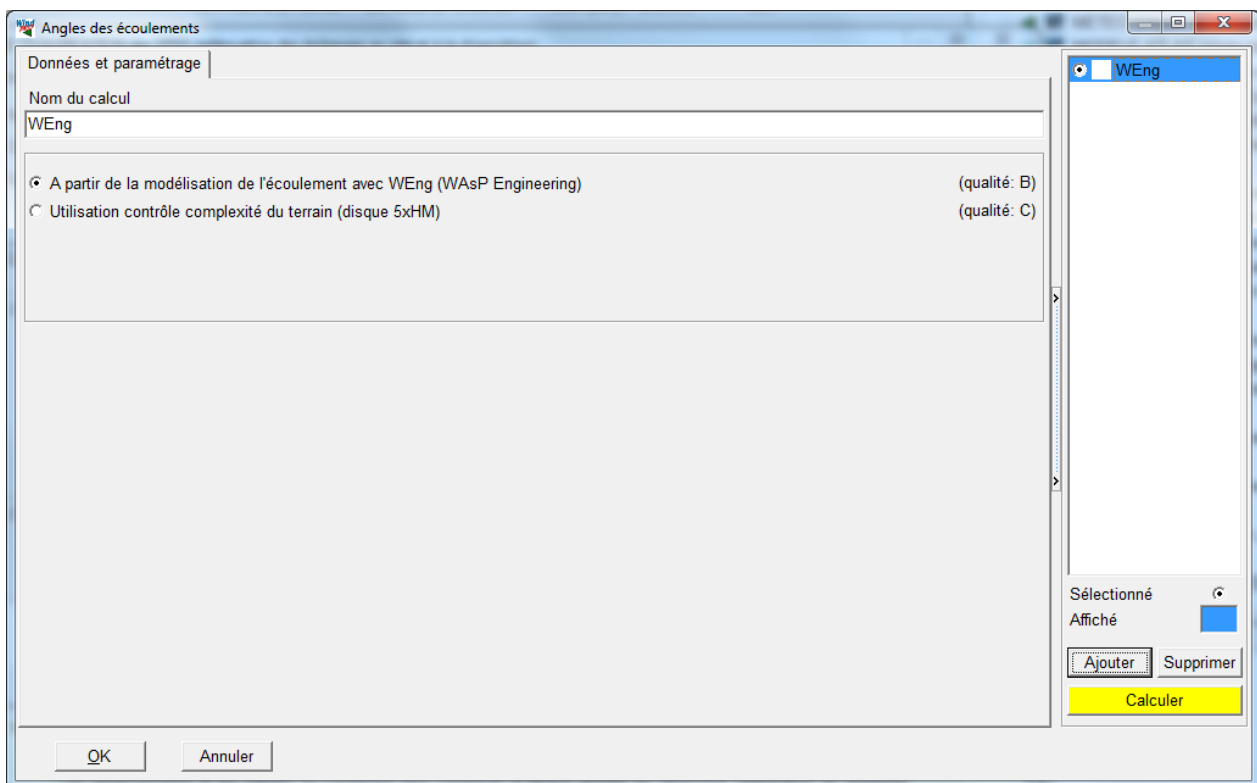


Figure 44

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

Onglet Résultats (tableau)

Le tableau de cet onglet donne, pour chaque éolienne, l'angle maximal de l'écoulement et le secteur dans lequel il se trouve.

En cliquant sur le « + » apparaissent les valeurs maximales trouvées dans chacun des secteurs autour de l'éolienne, voir Figure 45. Ces détails ne sont pas disponibles si, dans le paramétrage de l'onglet *Données et paramétrage*, l'option *Utilisation contrôle complexité du terrain* a été choisie.

Eoliennes	IEC min. [deg]	IEC max. [deg]	Direction [Deg]	Angle écoulement [Deg]
Siemens SWT-2.3-113	-8	8	90,0	0,2
			0,0	-0,1
			30,0	-0,1
			60,0	0,0
			90,0	0,2
			120,0	0,2
			150,0	0,2
			180,0	0,1
			210,0	0,0
			240,0	-0,1
Siemens SWT-2.3-113	-8	8	270,0	-0,1
			300,0	-0,2
			330,0	-0,1
			120,0	-0,5
			90,0	-0,9
			0,0	0,6
			90,0	1,2
Siemens SWT-2.3-113	-8	8	0,0	0,2
			120,0	-0,7

Figure 45

Onglet Résultats (graphiques)

Dans cet onglet, les résultats sont présentés sous forme graphique. Les limites IEC des angles d'écoulement  $\pm 8^\circ$  sont représentées par les deux lignes horizontales bleues, voir Figure 46.

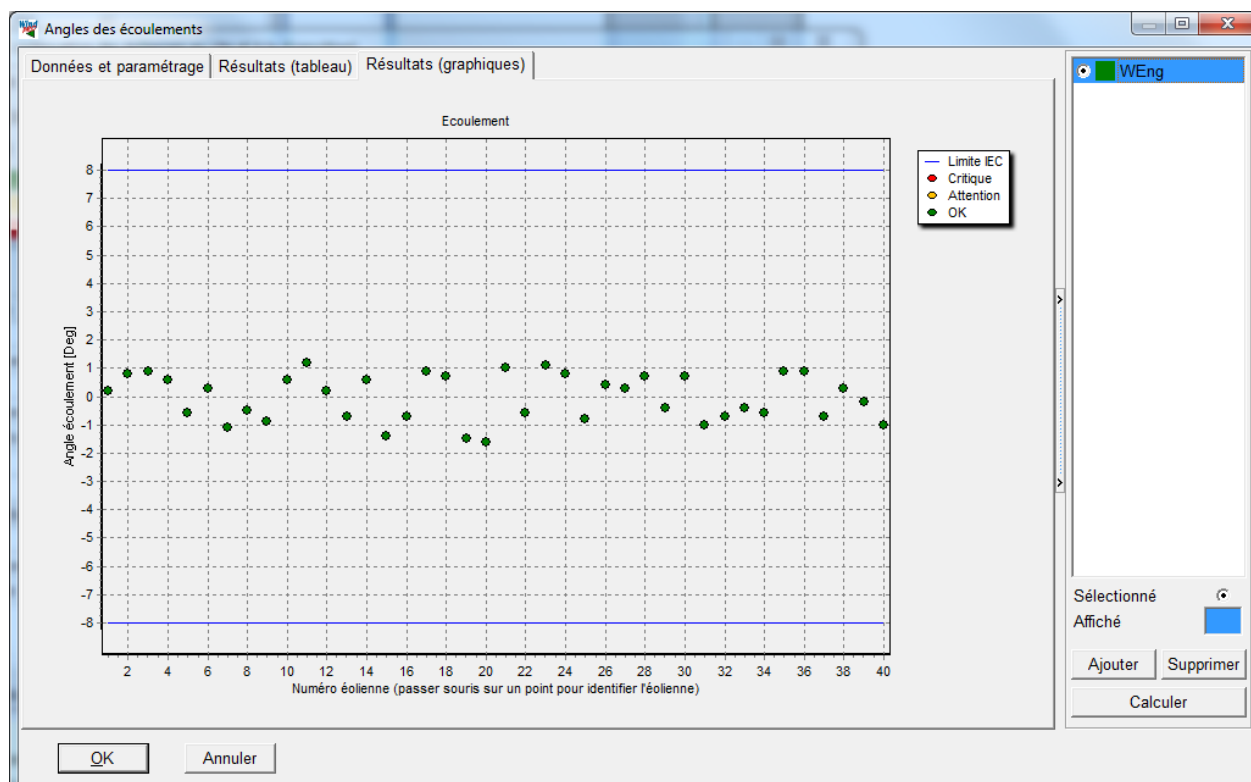


Figure 46

#### 13.2.4.2 Paramétrages du calcul

##### A partir de la modélisation de l'écoulement avec WEng (WAsP Engineering)

WEng est un modèle d'écoulement reconnu et couramment utilisé pour des calculs tels que les angles d'écoulement. Le paramétrage avancé de WEng permet d'utiliser un nombre de secteurs supérieur à 12 (qui est le nombre par défaut) permettant une analyse plus fine des angles.

WEng est un modèle d'écoulement linéarisé qui a tendance à surestimer la valeur des angles de l'écoulement quand les pentes du terrain sont importantes.

##### Utilisation contrôle complexité du terrain (disque 5xHM)

Le contrôle de la *Complexité du terrain* est décrit au 13.2.0.

Il est important de souligner que la « norme IEC » accepte l'utilisation des résultats du contrôle de la *Complexité du terrain* pour le contrôle des *Angles des écoulements*.

## 13.2.5 Cisaillements

### 13.2.5.0 Description et limites du contrôle

Le contrôle des *Cisaillements* examine la variation de la vitesse du vent sur la hauteur du rotor de chaque éolienne. La loi qui décrit le cisaillement est la « *Loi puissance* » caractérisée par son exposant,  $\alpha$ .

La limite de la « norme IEC » est une valeur moyenne supérieure à 0 mais qui ne doit pas dépasser 0,2 quel que soit la classe d'éolienne.

La « norme IEC » ne donne pas une définition claire de la valeur moyenne. On ne sait pas s'il s'agit de la valeur moyenne omnidirectionnelle de l'exposant  $\alpha$  ou de la moyenne des exposants  $\alpha$  de chaque secteur.

Etant donné que la loi décrivant le cisaillement n'est pas linéaire, ces deux moyennes sont légèrement différentes. La « norme IEC » [1] indique (au 11.3) que des secteurs d'au moins 30° doivent être utilisés pour estimer le cisaillement.

Le module *QUALIFICATION des SITES* calcule la moyenne pondérée des exposants  $\alpha$  de chaque secteur. Cette interprétation de la moyenne est conforme à celle adoptée par Risø/DTU pour son outil WAT [15].

### 13.2.5.1 Calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

#### Onglet Données et paramétrage

Cet onglet propose cinq méthodes d'estimation du cisaillement, voir Figure 47. Afin d'améliorer l'estimation, les deux premières combinent les valeurs mesurées et les valeurs calculées à partir d'un modèle d'écoulement. Les deux suivantes calculent les cisaillements en utilisant uniquement un modèle d'écoulement. La dernière utilise directement les cisaillements mesurés.

Plus d'informations sur ces méthodes sont données à la suite.

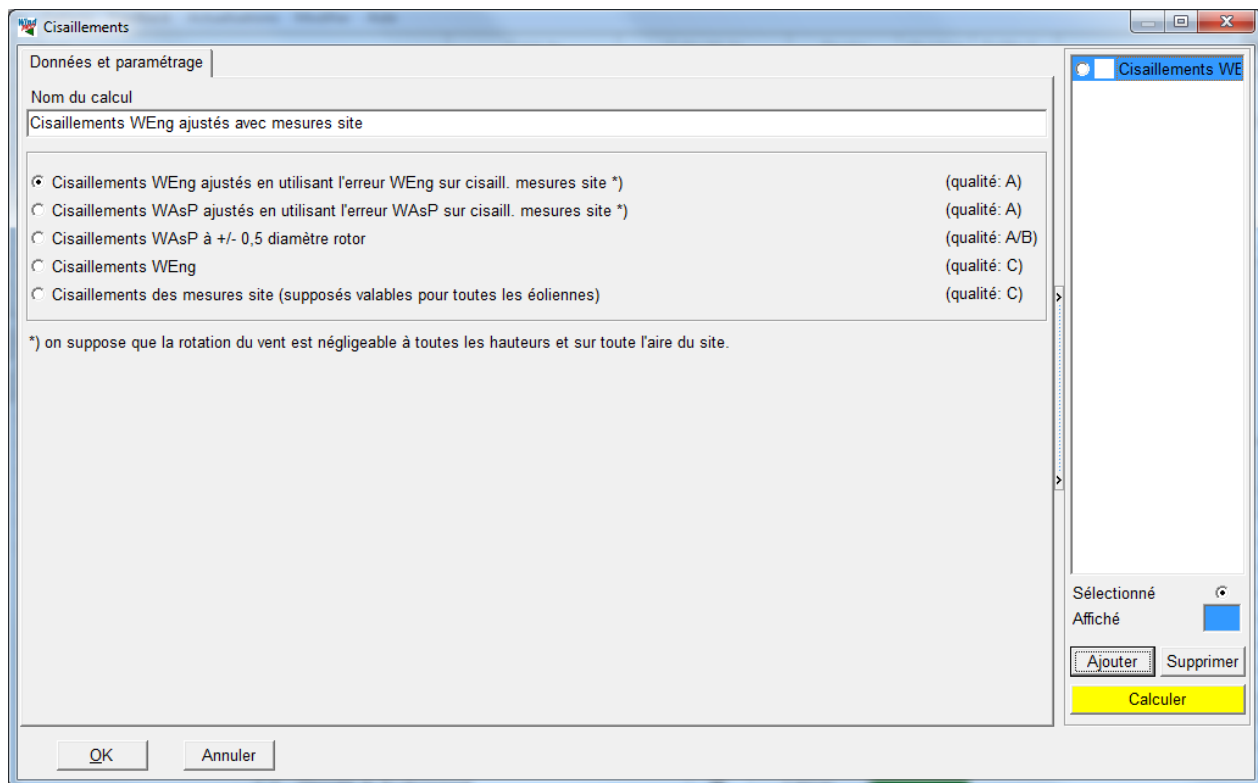


Figure 47

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

Onget Résultats (tableau)

Ce tableau montre, voir Figure 48, pour chaque éolienne, la valeur moyenne du cisaillement, *Cisaillement moy.*, et les limites supérieure et inférieure de la « norme IEC », *IEC min* et *IEC max*.

En cliquant sur le « + », on affiche les valeurs, par secteur, du *Cisaillement* et de la *Fréquence* du vent à partir desquelles est calculé le *Cisaillement moy.*

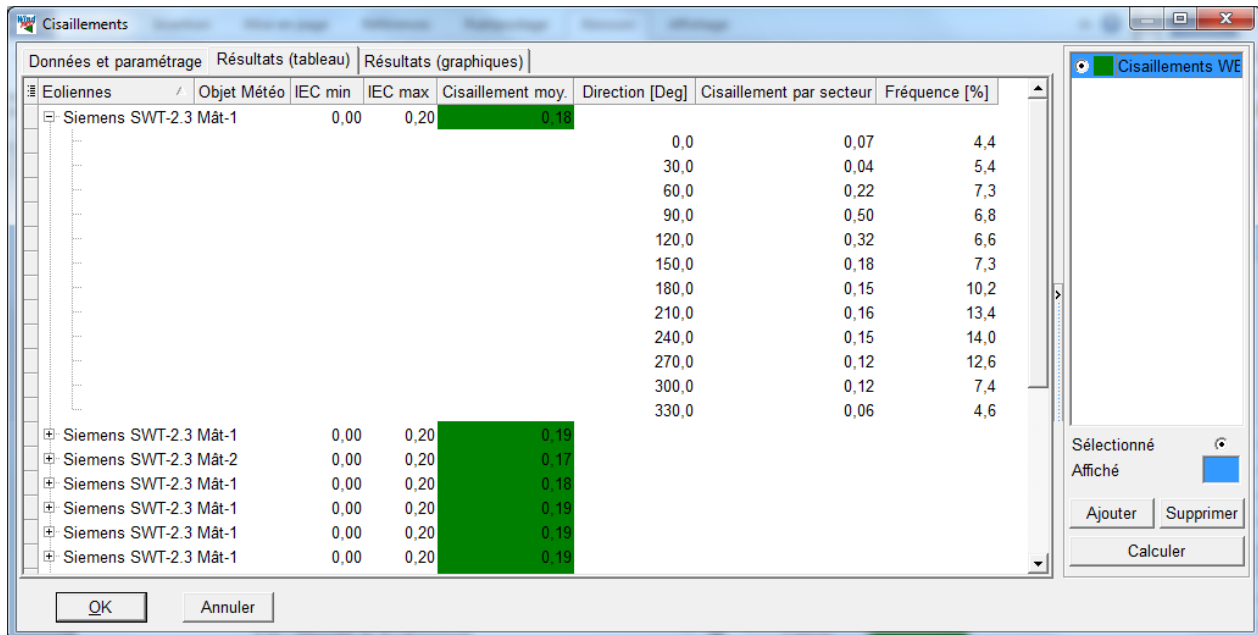


Figure 48

Onget Résultats (tableau)

Dans cet onget, les résultats sont présentés sous forme graphique. Les limites IEC du cisaillement sont représentées par les deux lignes horizontales bleues, voir Figure 49

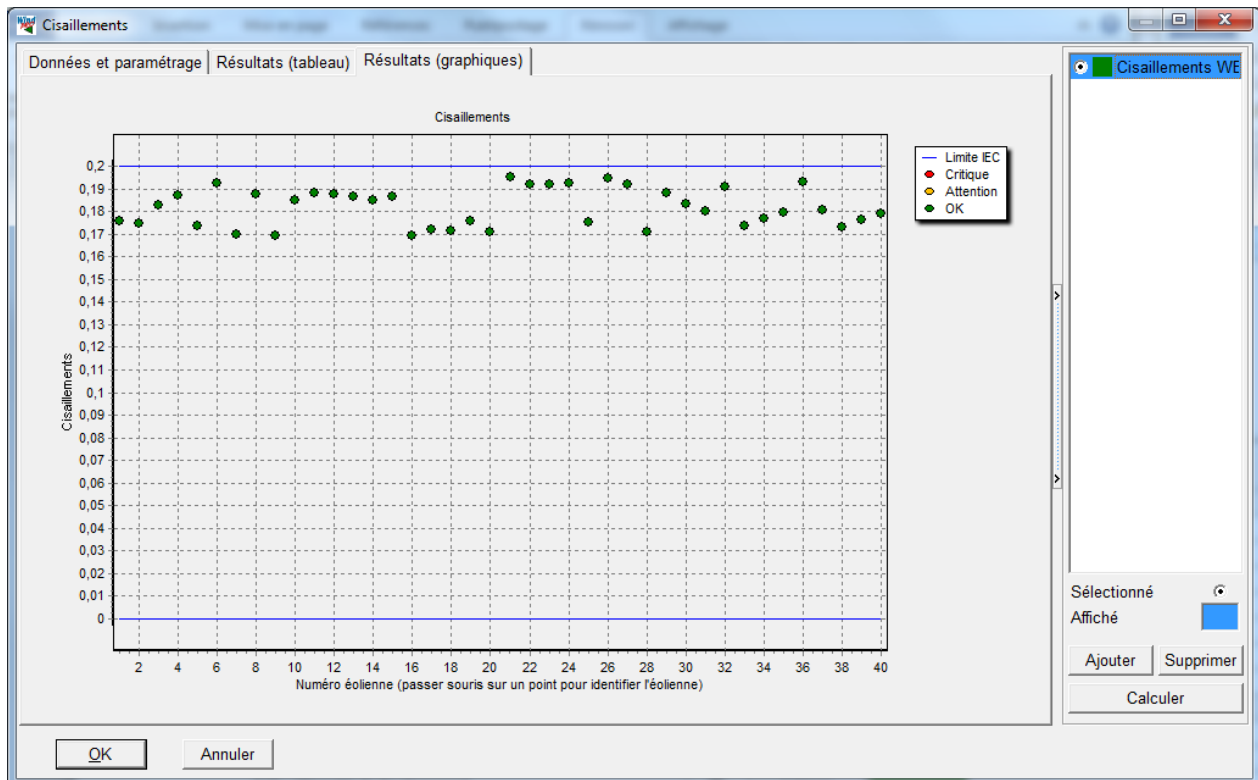


Figure 49

### 13.2.5.2 Paramétrages du calcul

Les options proposées dans l'onglet *Données et paramétrage*, voir Figure 50, sont présentées à la suite.

<input type="radio"/> Cisaillements WEng ajustés en utilisant l'erreur WEng sur cisail. mesures site *)	(qualité: A)
<input type="radio"/> Cisaillements WAsP ajustés en utilisant l'erreur WAsP sur cisail. mesures site *)	(qualité: A)
<input type="radio"/> Cisaillements WAsP à +/- 0,5 diamètre rotor	(qualité: A/B)
<input type="radio"/> Cisaillements WEng	(qualité: C)
<input type="radio"/> Cisaillements des mesures site (supposés valables pour toutes les éoliennes)	(qualité: C)

\*) on suppose que la rotation du vent est négligeable à toutes les hauteurs et sur toute l'aire du site.

Figure 50

#### Cisaillements WEng ajustés en utilisant l'erreur WEng sur cisaillement mesures site

Les cisaillements, par secteur, calculés avec WEng sont en général sensiblement sous-estimés car WEng fait l'hypothèse que la stabilité atmosphérique est neutre. En calculant les cisaillements au mât de mesures et en les comparant aux cisaillements mesurés, on peut estimer les biais produits par WEng et par conséquent les corriger. La méthode consiste donc à calculer les cisaillements à l'emplacement des éoliennes avec WEng, à leur appliquer les corrections, puis à calculer la moyenne, pondérée par la fréquence, des cisaillements corrigés. C'est la valeur ainsi obtenue qui est comparée aux limites IEC.

Le but de cette méthode est de combiner les avantages des mesures et les avantages du modèle d'écoulement. Les mesures donnent le cisaillement réel à l'emplacement du mât de mesures, mais ce cisaillement n'est pas forcément le même sur toute l'étendue du site. Le modèle d'écoulement est capable de calculer les différents cisaillements selon l'emplacement considéré mais avec le biais mentionné antérieurement.

Pour l'application de cette méthode, on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de rotation sensible du vent en fonction de la hauteur et en fonction de l'emplacement, autrement dit, le vent mesuré dans un secteur du mât de mesures va s'écouler sans changement de direction et atteindre le même secteur au niveau de l'éolienne.

Plus le secteur est grand plus l'hypothèse est valable. Les rotations du vent sont généralement très inférieures aux 30° d'un secteur standard, mais elles peuvent être considérables en terrain très complexe.

Il est très important de vérifier que les girouettes sont bien réglées et que les directions mesurées ne sont pas décalées. Il faut que les directions des mesurées soient justes pour être cohérentes avec les directions du modèle d'écoulement, sinon les calculs seront faussés.

#### Cisaillements WAsP ajustés en utilisant l'erreur WAsP sur cisaillement mesures site

Cette méthode est similaire à la précédente, seul le modèle d'écoulement change. Ici, WAsP remplace WEng. Les cisaillements calculés avec WAsP sont sensiblement différents de ceux calculés avec WEng car WAsP intègre un modèle de stabilité atmosphérique.

#### Cisaillements WAsP à +/- 0,5 diamètres de rotor

Le paramétrage par défaut de WAsP, calcule les caractéristiques du vent à hauteur de moyeu de l'éolienne (HM) et à  $HM + \frac{1}{2}$  rotor et à  $HM - \frac{1}{2}$  rotor. La connaissance des caractéristiques du vent à ces trois hauteurs permet d'estimer le cisaillement, par secteur, sur la hauteur du rotor et donc de calculer le *Cisaillement moy*.

Avec cette méthode la qualité du résultat est dépendante du bon réglage de WAsP. Le résultat sera bon si les paramètres WAsP de la stabilité atmosphérique sont correctement réglés. On vérifie leur bon réglage en comparant le profil vertical du vent relevé au mât de mesures avec celui calculé par WAsP à l'emplacement du mât, ils doivent être identiques.

Dans les régions tropicale et aux latitudes moyennes, le réglage par défaut de WAsP tend à surestimer le cisaillement car les réglages par défaut ont été définis à partir de mesures faites en Europe du nord.

#### Cisaillements WEng

Les résultats issus de WAsP Engineering incluent toutes les grandeurs relatives au champ de l'écoulement. C'est à partir de ces grandeurs que les cisaillements sont calculés exactement à hauteur de moyeu. Etant donné que WEng fait l'hypothèse que la stabilité atmosphérique est neutre les cisaillements calculés sont sensiblement sous-estimés. De manière générale, cette méthode n'est pas recommandable. Elle a été incluse pour faire des comparaisons avec des méthodes plus appropriées.

#### Cisaillements des mesures site

Cette méthode n'est valable que si les mesures sont totalement représentatives des conditions de vent aux emplacements et la hauteur du moyeu des éoliennes.

## 13.2.6 Densités de l'air

### 13.2.6.0 Description et limites du contrôle

L'estimation de la densité de l'air à hauteur de moyeu des éoliennes fait partie des prescriptions de la « norme IEC ».

Les standards de conception de la « norme IEC » sont définis pour une densité de l'air égale à  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Par conséquent, aux densités inférieures, pour des conditions de vent identiques, les efforts supportés par les machines sont moindres.

La « norme IEC » indique que la densité moyenne de l'air doit être calculée seulement pour les vitesses du vent supérieures à celle donnant la puissance nominale de l'éolienne,  $U_{\text{rated}}$ . Le respect rigoureux de la norme complexifie considérablement ce contrôle. Sur les tests effectués, on a constaté que la différence entre la densité annuelle moyenne de l'air et celle aux vitesses du vent supérieure à  $U_{\text{rated}}$  est de 1-2%. Etant donné les incertitudes qui affectent l'estimation de la densité de l'air, cet écart est négligeable. De plus, habituellement, les fabricants n'utilisent que la densité annuelle moyenne de l'air, par conséquent cette pratique a également été adoptée par le module *QUALIFICATION des SITES*.

Pour l'extrapolation des températures (et des pressions) de l'altitude des mesures à l'altitude des moyeux, le modèle ISO de l'atmosphère standard est utilisé conformément aux indications de la « norme IEC ».

La prise en compte de l'humidité relative pour le calcul de la densité de l'air a été écartée car son influence est négligeable. Comme le montre le graphique de la Figure 51, pour que la densité de l'air soit modifiée de 2%, il faut que la température dépasse  $35^\circ\text{C}$  et que l'humidité relative soit pratiquement de 100%. Dans la plupart des régions du monde l'influence de l'humidité relative sur la densité de l'air est inférieure à 1%. De plus, négliger l'humidité relative, conduit à utiliser des densités de l'air supérieures aux valeurs réelles et, par conséquent, à augmenter la sévérité du contrôle.

Note : pour information la température annuelle moyenne la plus élevée mesurée est de  $34^\circ\text{C}$  à Dalol en Ethiopie (<http://www.weatherexplained.com/Vol-1/Record-Setting-Weather.html#b>)

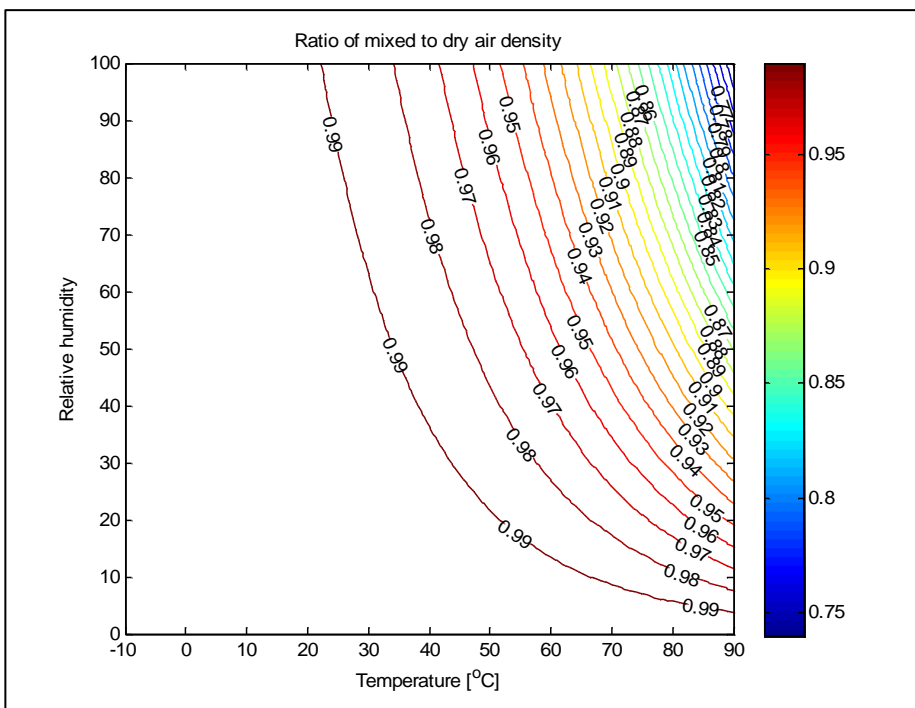


Figure 51

### 13.2.6.1 Calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

#### Onglet *Données et paramétrage*

Dans cet onglet la seule action à faire est le choix de la source des données. Plus d'informations sur l'alternative proposée sont données à la suite.

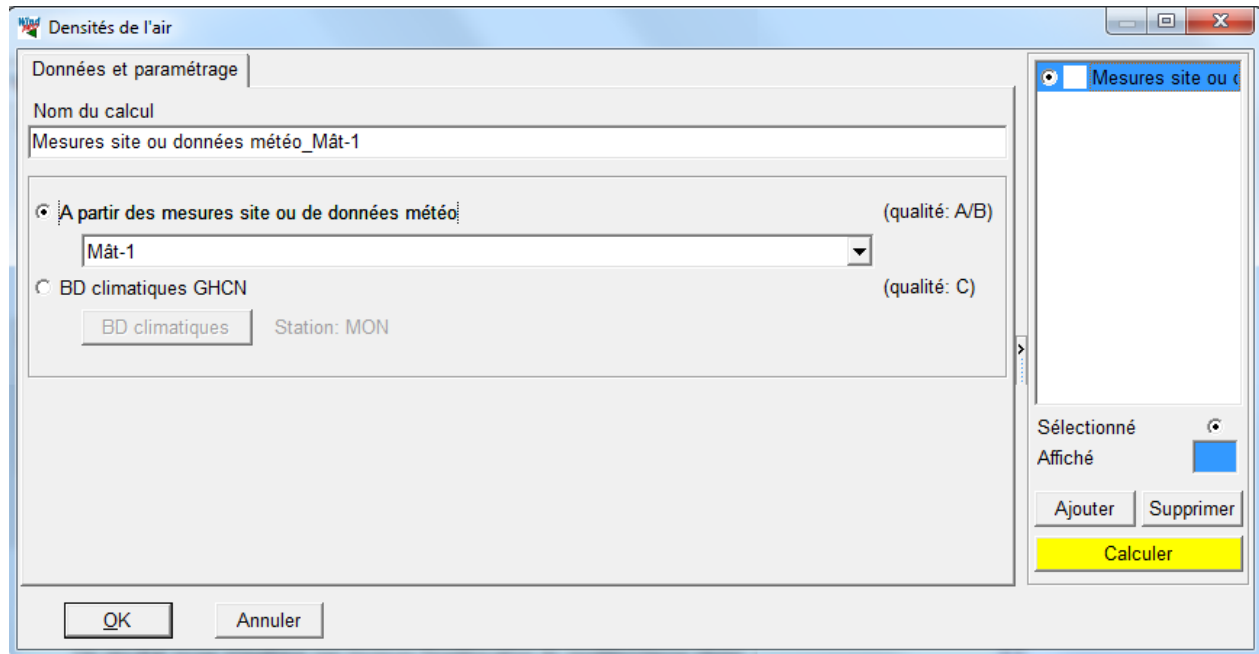


Figure 52

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

#### Onglet *Données utilisées*

L'onglet *Données utilisées* montre la *Température moy.* et l'*Altitude* de la source des données, les paramètres du modèle d'atmosphère utilisé et en dernier la *Densité de l'air* à la température et à l'altitude de la source.

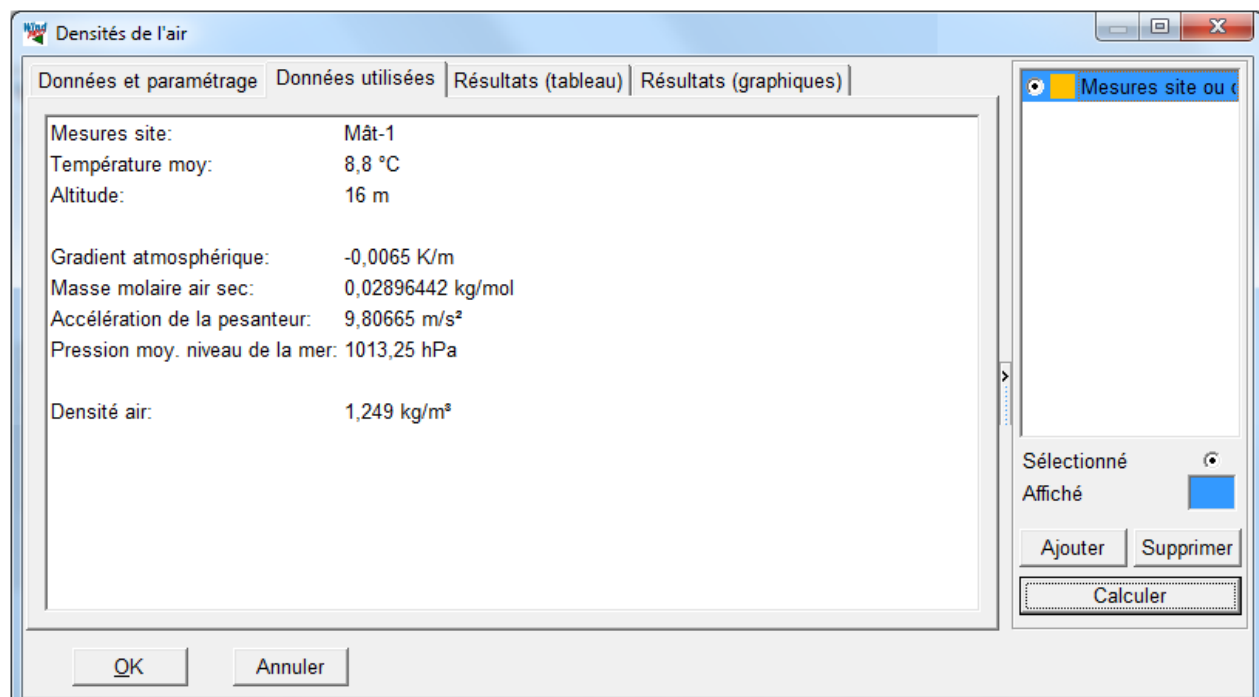


Figure 53



Onget Résultats (tableau)

La colonne *Densité moy. air* donne les densités moyennes annuelles de l'air à l'altitude des moyeux des éoliennes. La colonne *Différence altitude* donne les écarts d'altitude entre les moyeux des éoliennes et le point de mesure de la température.

Eoliennes	Limite IEC [kg/m³]	Densité moy. air [kg/m³]	Différence altitude [m]	Tp° moy. à haut. moyeu [°C]	Pression moy.
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	96,7	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	94,9	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	103,6	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	90,8	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	103,6	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,239	84,1	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	97,2	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	93,6	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	103,5	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	89,6	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	100,2	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	88,6	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	98,8	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	91,5	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	97,6	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,237	97,6	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	88,6	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	95,9	8,2	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	88,2	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,239	87,6	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,238	90,6	8,3	
Siemens SWT-2.3-113	1,225	1,239	87,5	8,3	

Figure 54

Onget Résultats (tableau)

Cet onget montre les résultats sous la forme graphique habituelle.

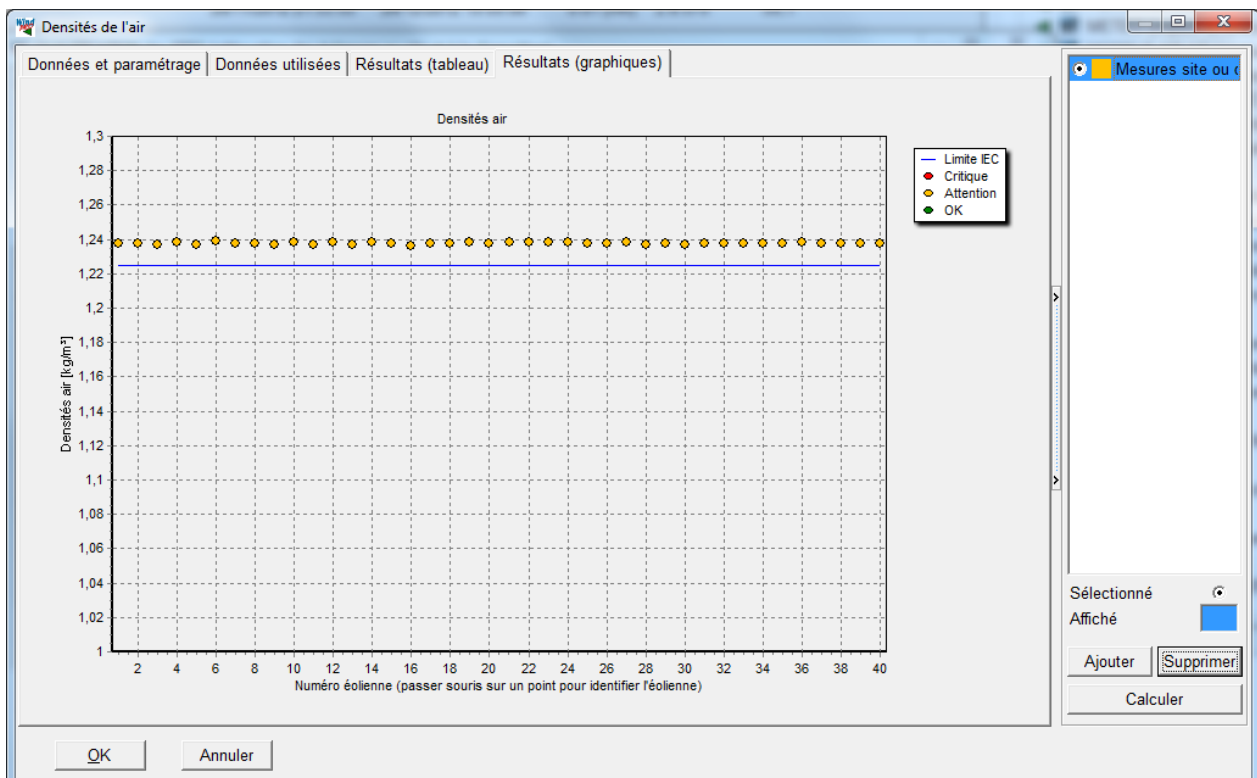


Figure 55

### 13.2.6.2 Paramétrages du calcul

Les deux options suivantes utilisent le même modèle d'extrapolation à hauteur de moyeu. La température est extrapolée en utilisant le gradient standard égal à  $-0.0065$  °C/m et la pression est extrapolée en introduisant la différence de température dans l'équation hydrostatique, si la pression n'est pas disponible c'est la pression standard au niveau de la mer qui est utilisée.

#### A partir des mesures site ou de données météo

Cette option permet d'utiliser les températures relevées sur le mât de mesures site (et les pressions si elles sont présentes, mais non nécessaires) ou téléchargées via le service *Données-online* (par ex. SYNOP, METAR, etc.). A cet effet, il faut indiquer dans l'onglet *Données de vent* quel objet *Météo* contient les *Données climatiques*, voir 13.1.1.

#### BD climatique GHCN

Si aucune information sur la température n'est disponible, on peut utiliser celles de la base de données climatiques du Global Historical Climatological Network (GHCN). Par défaut, les données de la station météo la plus proche du site seront sélectionnées. On peut choisir une autre station en cliquant sur le bouton *BD climatiques*.

GHCN est une base de données gérée par la NOAA (National Oceanic And Atmospheric Administration) des Etats-Unis. Elle contient l'historique des statistiques climatiques de nombreuses stations météo du monde entier.

Voir <http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/>.

---

## 13.3 Contrôles additionnels

La « norme IEC » ajoute aux *Contrôles principaux* une liste de *Contrôles additionnels* dont les résultats doivent être comparés au cahier des charges de conception des éoliennes. L'estimation de l'aléa sismique sert en plus à savoir si l'utilisation du site nécessitera des actions supplémentaires.

- **Aléa sismique**
- **Températures extrêmes**
- **Densité de foudroiement**
- Gel, grêle et neige
- Humidité
- Irradiation solaire
- Substances chimiques agressives
- Salinité

Le module *QUALIFICATION des SITES* intègre les contrôles imprimés en gras dans la liste précédente. Ce choix est le résultat des contraintes et des objectifs suivant : possibilité d'implémenter un modèle capable de mettre en œuvre le contrôle, disponibilité des données pour alimenter le modèle et importance du contrôle pour la bonne suite du projet.

### 13.3.0 Aléa sismique

#### 13.3.0.0 Description et limites du contrôle

La « norme IEC » demande l'estimation de l'*Accélération pic du sol (PGA)* dont la période de retour est de 475 ans pour le site étudié. Cette période de retour correspond à l'*Accélération pic du sol* dont la probabilité d'être dépassé au cours d'une année est égale à 0,2%.

La « norme IEC » ne donne aucune valeur maximale pour l'*Accélération pic du sol*. Le module *QUALIFICATION des SITES* présente les niveaux de l'aléa sismique du GSHAP en les qualifiant de la manière suivante : *Faible* -> résultat = *OK*, *Modéré* -> résultat = *Attention*, *Fort* et *Très fort* -> résultat = *Critique*, dans ce dernier l'aléa sismique doit être étudié en détail.

Les valeurs de l'*Accélération pic du sol* produites par le module *QUALIFICATION des SITES* proviennent de la base de données Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) financé par les Nations Unies. La GSHAP rassemble les *Accélérations pic du sol* provenant de divers programmes nationaux et régionaux. Elles sont données en  $m/s^2$  avec une résolution de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Les données de la GSHAP sont disponibles via les sites de l'ETHZ ou du GeoForschungsZentrum Potsdam.

La Figure 56 montre le niveau de l'aléa sismique sur la mappemonde.

Les valeurs de l'*Accélération pic du sol* de la GSHAP sont données pour des sous-sols rocheux (rock/firm soil in US/Canada). Par conséquent, la nature du sous-sol sur lequel est implanté le site peut modifier considérablement la valeur donnée par la GSHAP. Par exemple, un sous-sol formé d'une épaisse couche sédimentaire peut amplifier les accélérations données pour un sous-sol rocheux.

Néanmoins, la GSHAP est considérée comme une source de confiance car elle se fonde sur les études réalisées par les administrations et des experts locaux.

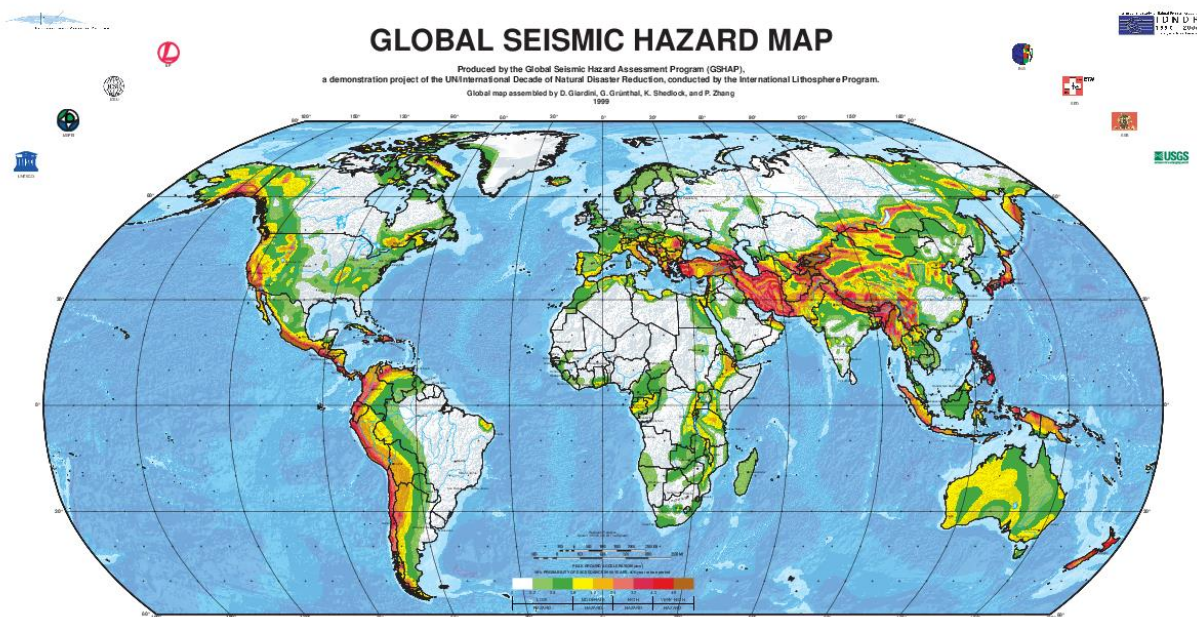


Figure 56

### 13.3.0.1 Paramétrage, calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

#### Onglet *Données et paramétrage*

Aucun paramétrage préalable n'est requis pour effectuer le contrôle de l'*Aléa sismique* car il se fonde sur l'unique source disponible, la GSHAP, voir Figure 57.

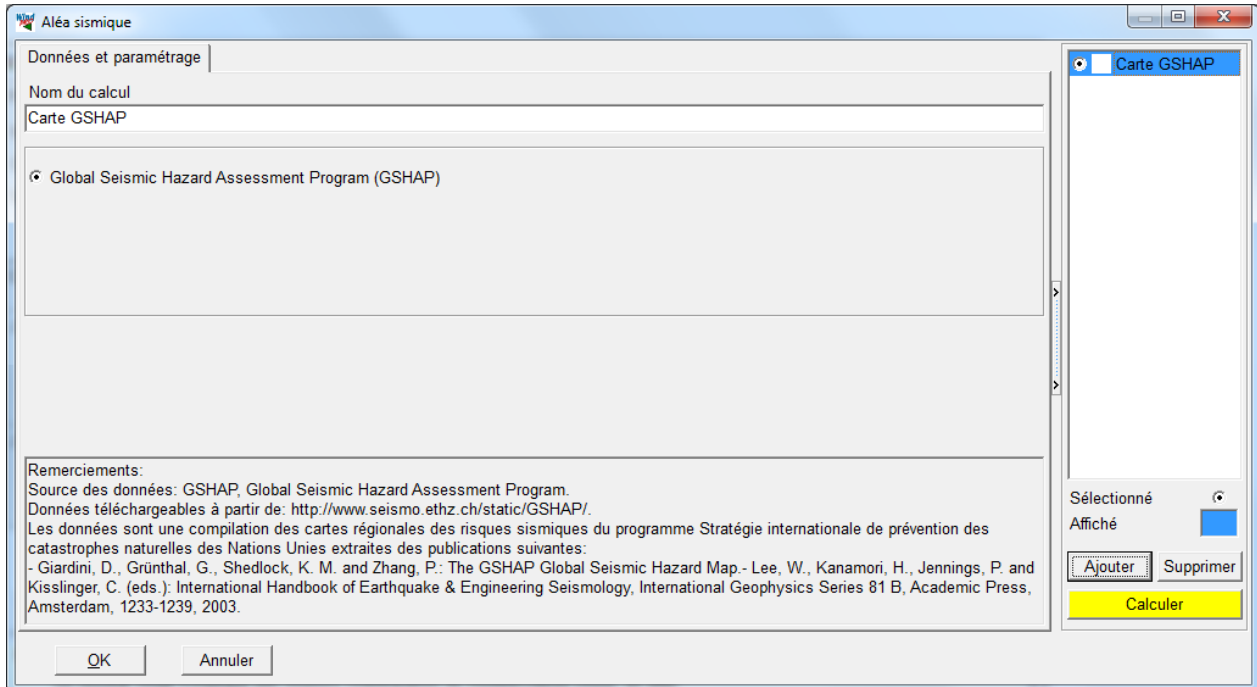


Figure 57

Il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune pour continuer. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

#### Onglet *Résultats (tableau)*

Cet onglet quantifie l'aléa sismique en indiquant l'*Accélération pic du sol* dont la période de retour = 475 ans et qualifie le niveau de l'aléa sur une échelle de *Faible* à *Très fort*. Voir Figure 58.

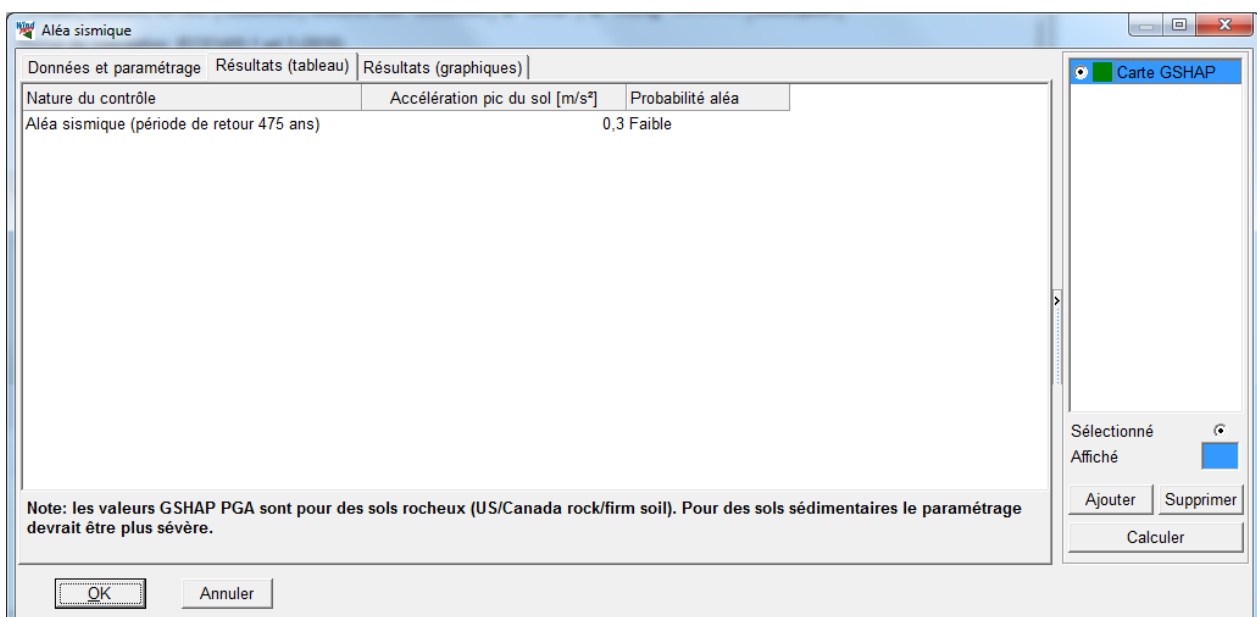


Figure 58

Onglet Résultats (graphiques)

Cet onglet cartographie l'aléa sismique sur une zone d'environ 1000 x 1000 km autour du site. Les données de la GSHAP étant issues d'études locales, il peut arriver que la carte présente des discontinuités comme c'est le cas au passage de la frontière USA-Canada de la Figure 59.

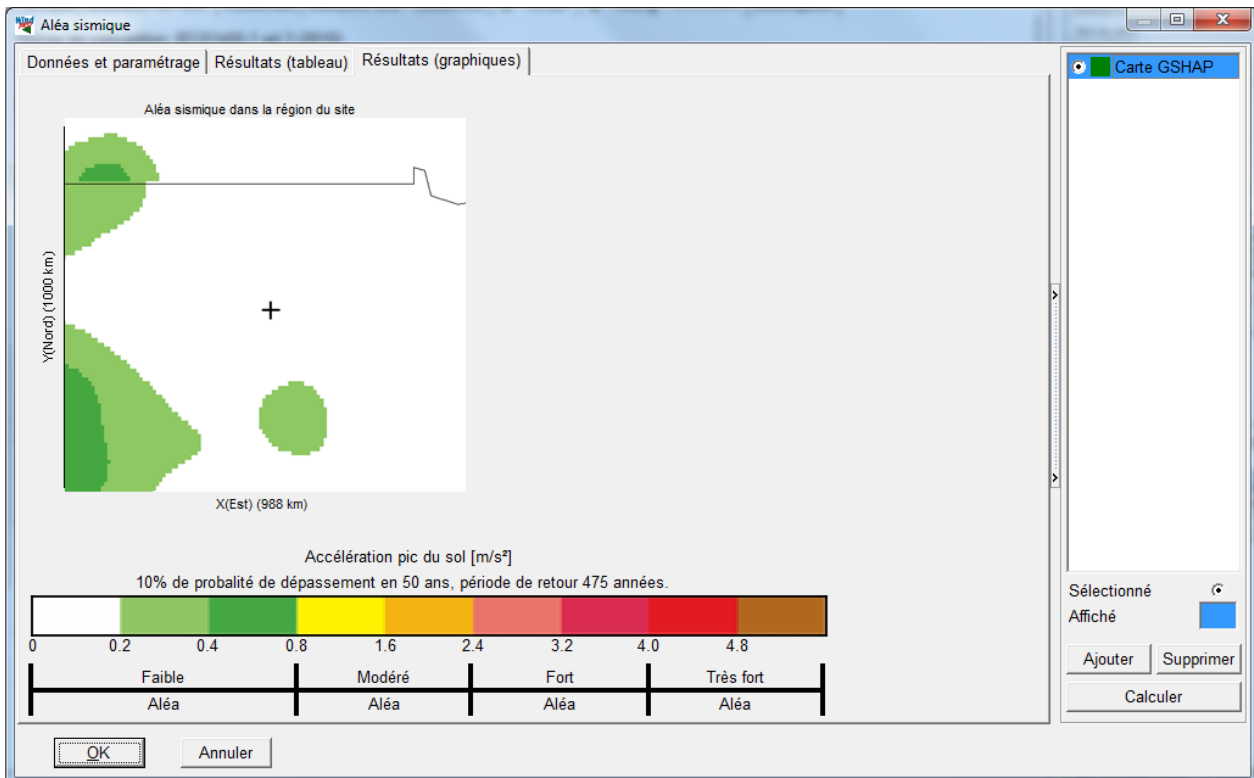


Figure 59

### 13.3.1 Températures de fonctionnement

#### 13.3.1.0 Description et limites du contrôle

Deux intervalles de température sont définis : l'intervalle des *Températures normales* de fonctionnement des éoliennes en dehors duquel elles doivent être arrêtées et l'intervalle des *Températures extrêmes* dont le dépassement des limites conduira à des dégradations irréversibles de certains composants des machines.

La « norme IEC » donne ces deux intervalles identiques pour toutes les classes standards des éoliennes :

- *Températures normales* : -10°C à +40°C
- *Températures extrêmes* : -20°C à +50°C

Pour répondre aux besoins particuliers de certains marchés, tous les fabricants proposent des versions de leurs machines avec des intervalles de fonctionnement élargis. Ces éoliennes sont des machines de *Classe S* dont les bornes supérieure et inférieure des intervalles sont typiquement repoussées d'une dizaine de °C. Le module *QUALIFICATION des SITES* est capable de prendre en compte les *Classe S*.

#### 13.3.1.1 Calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

##### Onglet *Données et paramétrage*

Voir Figure 60.

Le calcul fait appel à des données de température sous forme de séries temporelles, typiquement des températures relevées sur le mât de mesures du site. Dans le menu déroulant *Données de température (site ou station météo)*, il faut indiquer l'objet *Météo* contenant les températures.

Les options sous *Ajustement avec une distribution normale* sont expliquées dans la suite.

Figure 60

Si vous laissez le paramétrage par défaut, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

Onglet Données utilisées

Cet onglet synthétise les données utilisées et donne l'altitude moyenne des moyeux des éoliennes qui sera utilisé pour faire un seul contrôle pour l'ensemble du site, voir Figure 61.

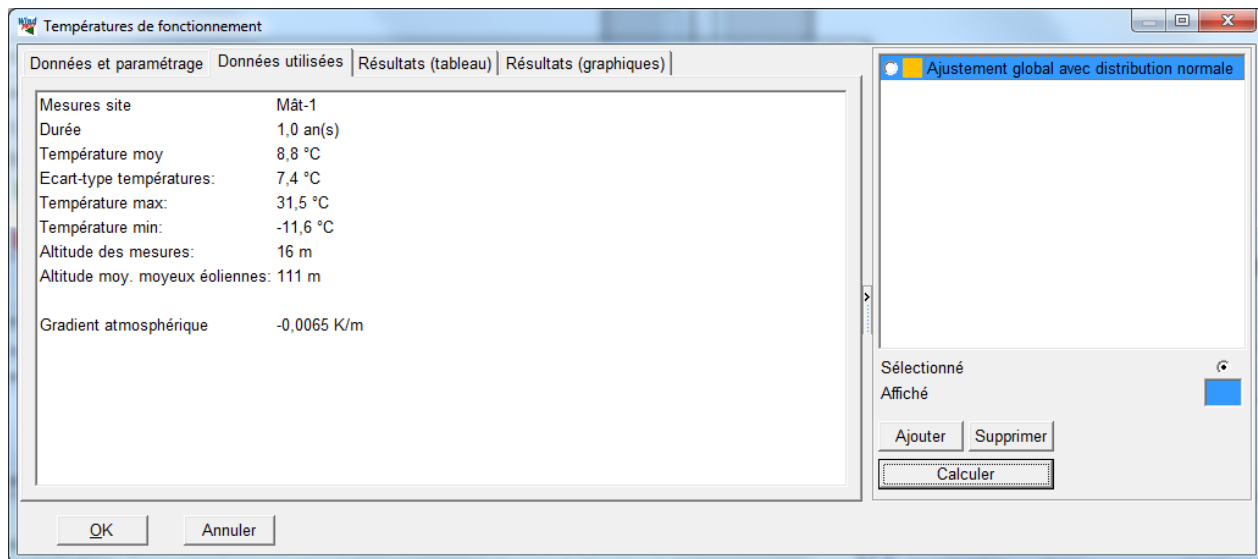


Figure 61

Onglet Résultats (tableau)

Les colonnes  $Tp^0 \min$  et  $Tp^0 \max$  rappellent les bornes des intervalles des *Températures normales* et des *Températures extrêmes*.

Les colonnes *Heures <  $tp^0 \min$* , *Heures >  $tp^0 \max$* , donnent la décomposition du *Total des heures hors limites* de fonctionnement au cours d'une année.

Voir Figure 62.

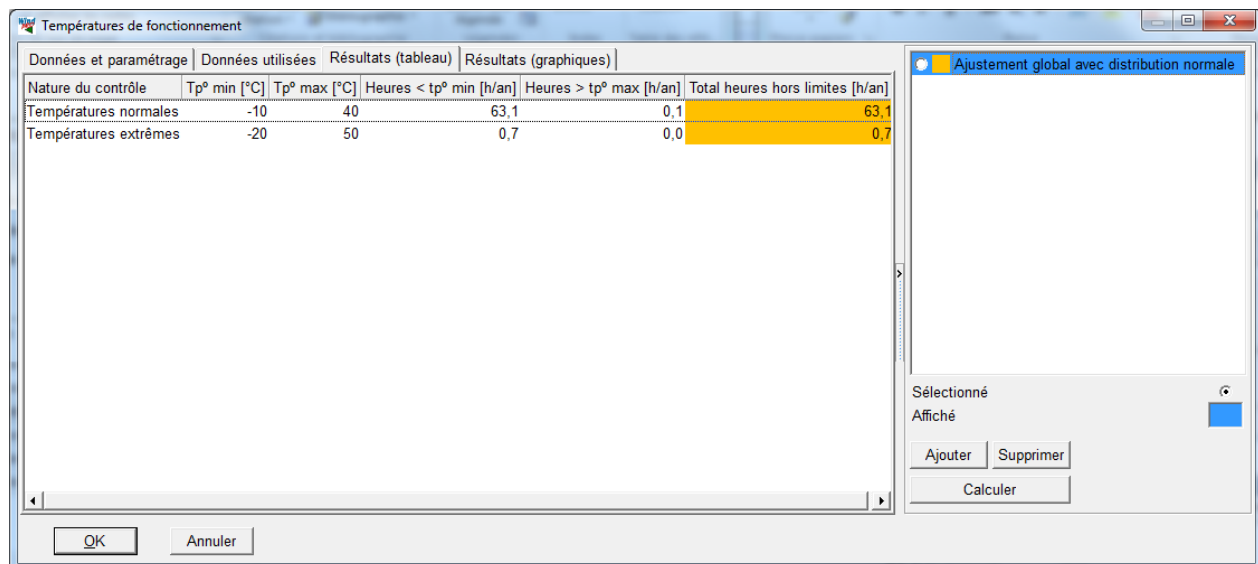


Figure 62



Onglet Résultats (graphiques)

Voir Figure 63.

Graphique *Répartition* : la courbe verte est la répartition des heures de l'année en fonction de la température ; la courbe bleu est la répartition de la distribution normale ajustant la distribution du nombre d'heures par an en fonction de la température. Note : la courbe bleue n'apparaît que si l'option *Ajustement global* a été cochée.

Ces courbes permettent de lire la *Probabilité* de fonctionnement des éoliennes à « une température inférieure à ». Les lignes verticales rouges représentent les intervalles des *Température normales* et des *Températures extrêmes*. Ce graphique permet donc de lire la probabilité de fonctionnement des éoliennes hors de ces intervalles.

Graphiques *Premier quartile* et *Dernier quartile* : le graphique de gauche et celui de droite présentent respectivement le premier quartile et le dernier quartile de la distribution du nombre d'heures par an en fonction de la température, courbe verte ; la courbe bleu est l'ajustement de la distribution verte par une distribution normale. Les lignes verticales rouges représentent les intervalles des *Température normales* et des *Températures extrêmes*. Ces graphiques permettent de lire, directement en nombre d'heures, les durées annuelles probables de fonctionnement des éoliennes en dehors de ces intervalles.

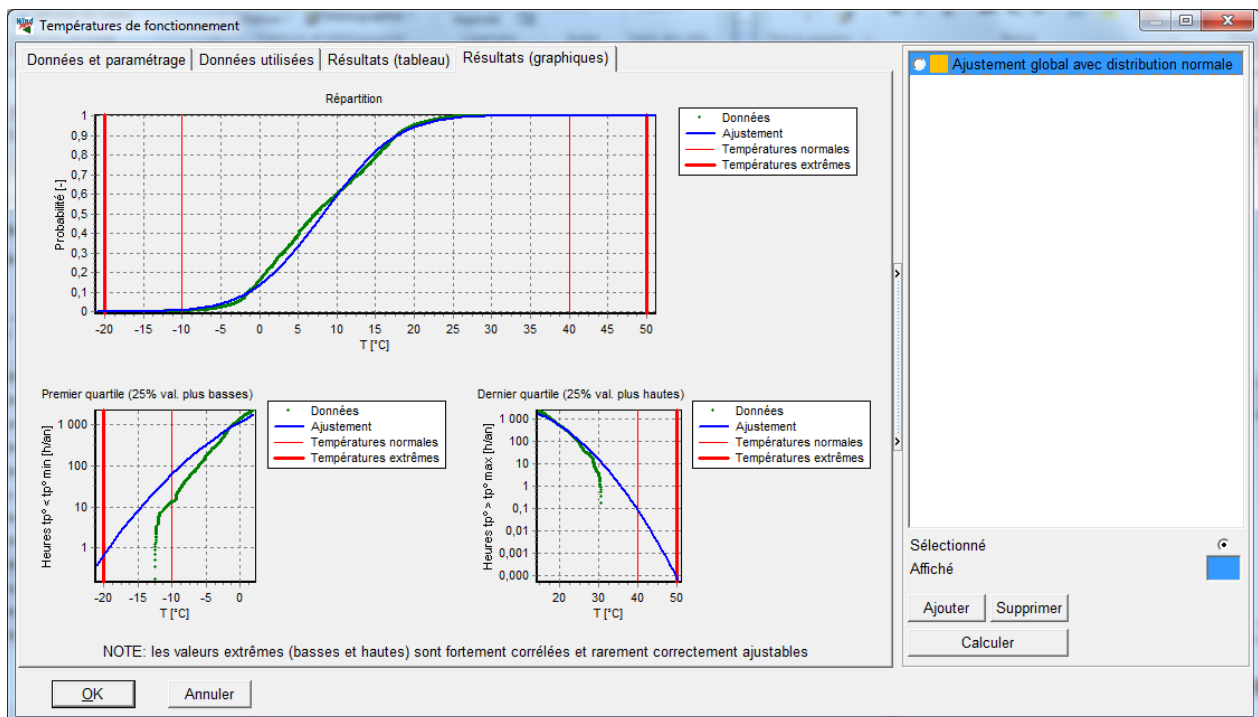


Figure 63

### 13.3.1.2 Paramétrages du calcul

#### Choix des données et du type d'ajustement des données

Voir Figure 64.

##### 1) Données de température (site ou station météo)

Ce menu déroulant permet d'indiquer l'objet *Météo* contenant les températures.

Le calcul fait appel à des données de température sous forme de séries temporelles, typiquement des températures relevées sur le mât de mesures du site.

En l'absence de mesures de la température sur le site, les données des stations SYNOP, téléchargeables automatiquement dans un objet *Météo* via le service *Données-online*, constituent une bonne alternative. Il est très important de forcer l'altitude de l'objet *Météo* pour qu'elle soit égale à celle de la station sinon les calculs seront faussés.

##### 2) Ajustement global

Cette option réalise un ajustement par une distribution normale (même moyenne et même écart-type) de la distribution du nombre d'heures par an en fonction de la température. L'utilisation de l'*Ajustement global* n'est pas satisfaisant sur tous les sites, on utilise alors l'*Ajustement des extrêmes*.

3) *Ajustement des extrêmes*

Il est courant de constater un écart important des queues de la distribution réelle avec celles l'*Ajustement global* décrit antérieurement. On utilise alors cette option qui réalise séparément, avec des distributions normales, les ajustements des queues de la distribution réelle.

Le champ *Ajuster les fractions extrêmes* permet définir l'étendue de l'ajustement. Par défaut, l'ajustement porte sur le premier et le dernier décile (10%).

Choix des données et du type d'ajustement des données.

Données de température (site ou station météo)

Mât-1

Ajustement avec une distribution normale

Ajustement global

Ajust. des extrêmes    Ajuster les fractions extrêmes    10 %

Figure 64

Températures de fonctionnement

Voir Figure 65.

1) *Limites standards*

Par défaut les *Limites standards* sont utilisées pour effectuer les contrôles.

2) *Limites classe S*

Cette option permet de traiter des cas particuliers. Par exemple, le fabricant Vestas fournit toutes ses machines avec une plage des *Températures normales* de fonctionnement étendue à -20°C.

Cette option permet aussi de rechercher les intervalles adéquats si le contrôle avec les *Limites standards* s'est révélé *Critique*. Habituellement, les fabricants proposent des modèles spéciaux pour les environnements chauds et froids. Par exemple, pour les pays froids les *Températures normale* et *extrême* basses peuvent être repoussées à -30°C et -40°C respectivement.

Températures de fonctionnement

Limites standards     Limites classe S (entrez-les ci-dessous)

	Standard	Classe S
Températures normales		
Tp° min [°C]	-10	-10
Tp° max [°C]	40	40
Température extrêmes		
Tp° min [°C]	-20	-20
Tp° max [°C]	50	50

Figure 65

## 13.3.2 Densité de foudroiemment

### 13.3.2.0 Description et limites du contrôle

L'estimation de la densité de foudroiemment du site étudié se fait en utilisant la base de données Global Hydrology and Climate Center (GHCC) de la NASA [17].

Les informations de cette base de donnée ont été collectées à partir de satellites équipés de capteurs utilisant deux types de technologies : LIS (Lightning Imaging Sensor) et OTD (Optical Transient Detector).

La « norme IEC » ne donne aucune valeur limite pour la densité de foudroiemment.

### 13.3.2.1 Paramétrage, calculs et résultats

La suite décrit le déroulement typique du contrôle.

#### Onglet Données et paramétrage

Aucun paramétrage préalable n'est requis pour effectuer le contrôle de la *Densité de foudroiemment* car il se fonde sur l'unique source disponible, NASA GHCC. Voir Figure 66.

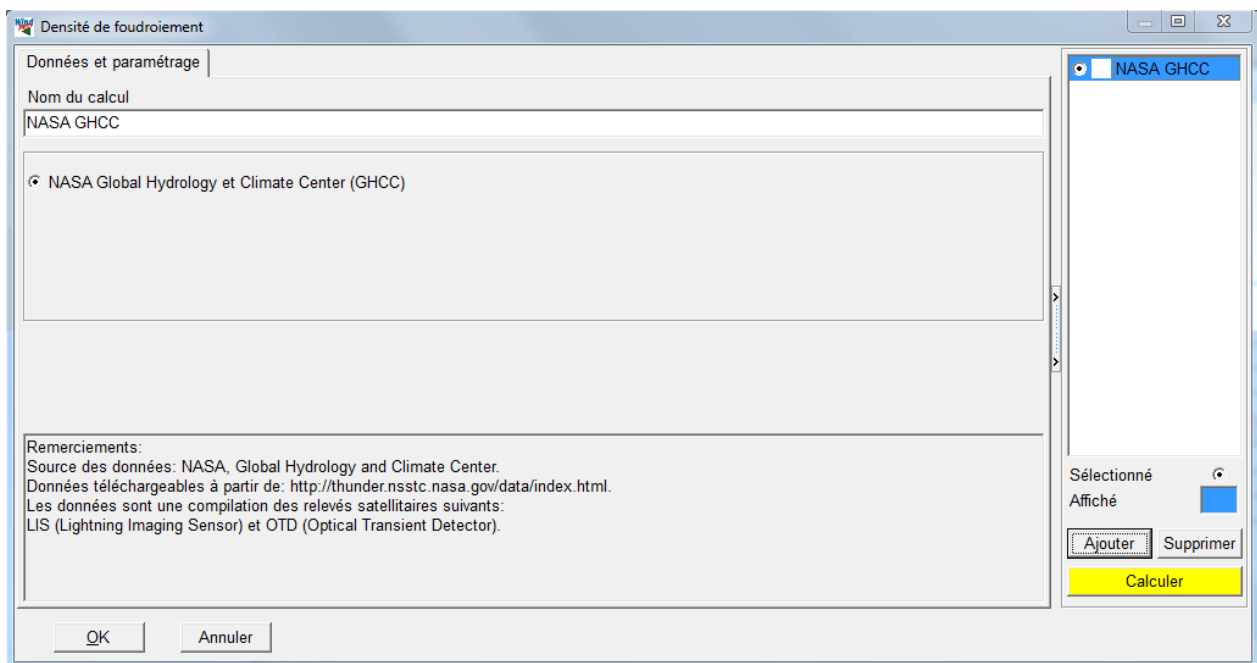


Figure 66

Pour continuer, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculer* en surbrillance jaune. A la fin du calcul plusieurs nouveaux onglets apparaissent.

#### Onglet Résultats (tableau)

La *Densité de foudroiemment* est donné en nombre d'*Impacts de la foudre / an / km<sup>2</sup>*. Voir Figure 67.

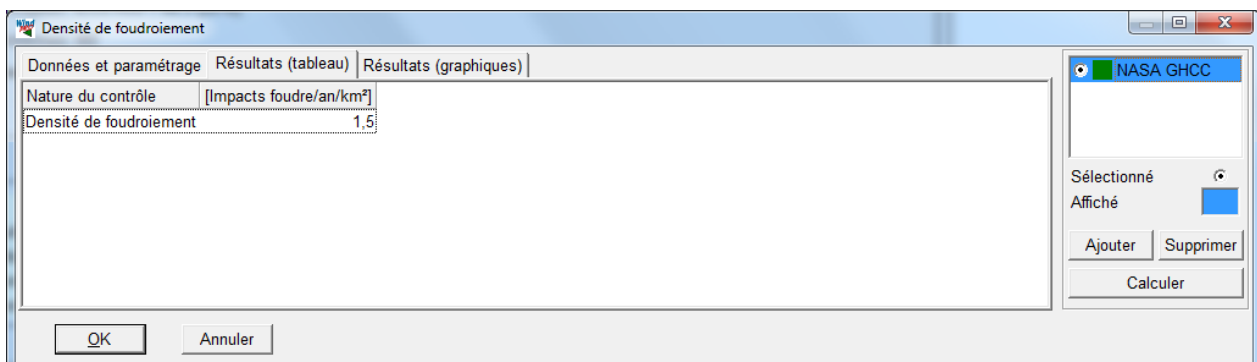


Figure 67

Onglet Résultats (graphiques)

Cet onglet montre la densité de foudroiement sur une zone d'environ 1000 x1000 km autour du site. Voir Figure 68.

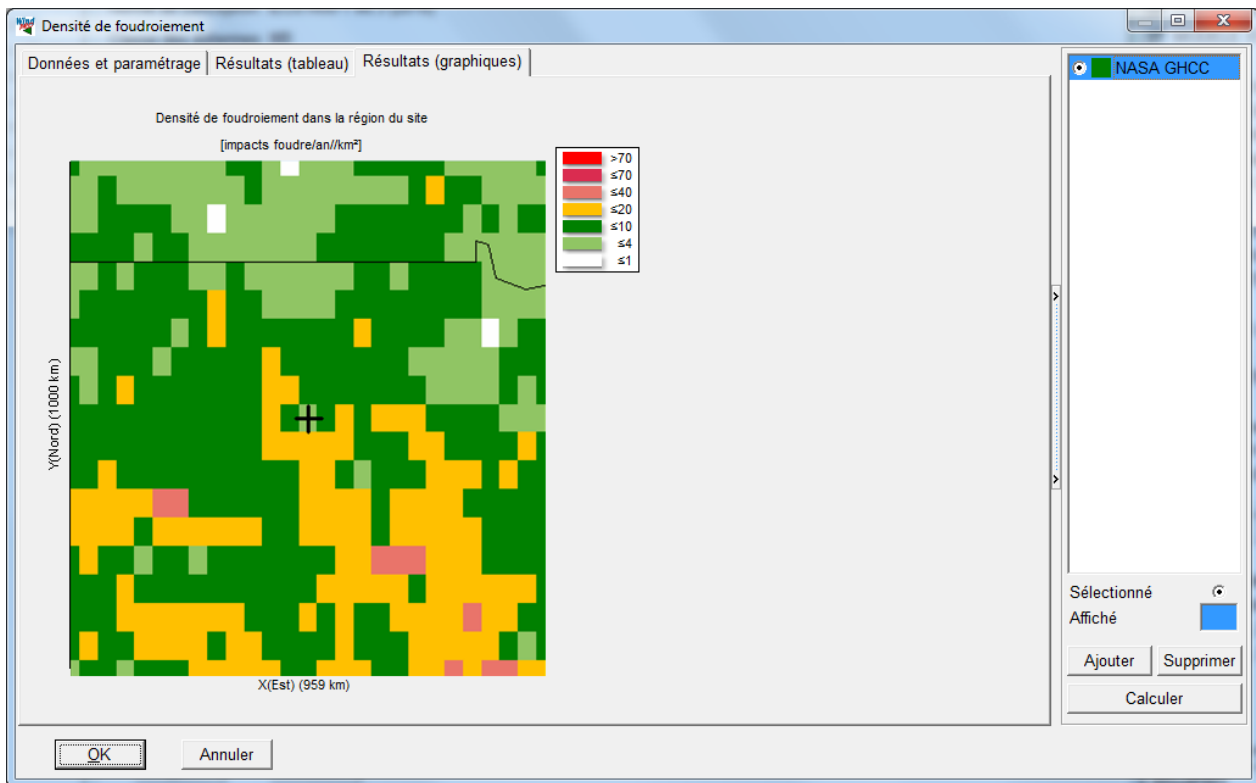


Figure 68

## 13.4 Tout (re)calculer

L'onglet *Contrôle* donne une synthèse globale des résultats.

La Figure 70, montre le résultat d'une première étude effectuée avec des éoliennes de classe IIIB où cinq contrôles sont verts (*OK*), trois sont jaunes (*Attention*) et deux sont rouges (*Critique*).

**Norme de conception: IEC61400-1 ed. 3 (2010)**

Utiliser classes objets Eoliennes  
 Forcer la classe des éoliennes à

Classes définies par la norme:

Classes de vit. du vent	I	II
Vréf [m/s]	50,0	40,0
Vmoy. [m/s]	10,0	10,0

Classes de turbulence

	A	B
lréf [-]	0,16	0,14

Menu déroulant: IIIB (sélectionné), IA, IB, IC, IIA, IIB (sélectionné), IIC, IIIA, IIIB

Refaire une étude est extrêmement facile et très rapide avec le module *QUALIFICATION des SITES*. En effet, il suffit de retourner à l'onglet *Principal* et de choisir, dans ce cas, une classe d'éolienne supérieure dans le menu *Forcer la classe d'éoliennes* à, voir Figure 69.

Figure 69

Ensuite, il faut retourner à l'onglet *Contrôles*, où tous les résultats sont redevenus blancs, car un paramètre fondamental a été modifié, et relancer les contrôles en cliquant sur le bouton *Tout (re)calculer*, après quelques instants les nouveaux résultats sont affichés.

La Figure 70 montre les résultats de cette deuxième étude avec des éoliennes de classe IIB où il n'y a plus de contrôles en rouge (*Critique*).

IIIB					IIB				
QUALIFICATION des SITES (adéquation des éoliennes au site et à la disposition)					QUALIFICATION des SITES (adéquation des éoliennes au site et à la disposition)				
Principal   Données de vent   Eoliennes   Mesures site - Eoliennes   ✓ WAsP   ✓ WEng   Contrôles   Description					Principal   Données de vent   Eoliennes   Mesures site - Eoliennes   ✓ WAsP   ✓ WEng   Contrôles   Description				
Norme de conception: IEC61400-1 ed.3 (2010)					Norme de conception: IEC61400-1 ed.3 (2010)				
Classe des éoliennes: IIIB					Classe des éoliennes: IIB				
<b>Légende résultat</b> <span style="color: green;">■</span> OK    Aucune éolienne hors limites IEC <span style="color: yellow;">■</span> Attention    ≥1 éoliennes hors limites IEC - situation à priori non critique <span style="color: red;">■</span> Critique    ≥1 éoliennes hors limites IEC - situation à priori critique					<b>Légende résultat</b> <span style="color: green;">■</span> OK    Aucune éolienne hors limites IEC <span style="color: yellow;">■</span> Attention    ≥1 éoliennes hors limites IEC - situation à priori non critique <span style="color: red;">■</span> Critique    ≥1 éoliennes hors limites IEC - situation à priori critique				
Contrôles	Sélecti on	Paramétrage des contrôles	Résultat	Commentaires	Contrôles	Sélecti on	Paramétrage des contrôles	Résultat	Commentaires
- A: Contrôles principaux									
Complexité du terrain	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Complexité du terrain	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Vitesses extrêmes du vent	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Vitesses extrêmes du vent	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Turbulences effectives	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Turbulences effectives	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Distributions des vitesses du vent	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Distributions des vitesses du vent	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Angles des écoulements	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Angles des écoulements	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Cisailllements	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Cisailllements	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Densités de l'air	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Densités de l'air	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
- B: Contrôles additionnels									
Aléa sismique	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Aléa sismique	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Températures de fonctionnement	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Températures de fonctionnement	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		
Densité de foudroiement	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer			Densité de foudroiement	<input checked="" type="checkbox"/>	Lancer		

Figure 70

Le module *QUALIFICATION des SITES* n'est pas capable de calculer la résistance des machines aux effets cumulés des différents phénomènes contrôlés car seul le fabricant dispose du modèle aéroélastique de l'éolienne et connaît les marges de sécurité prises lors de sa conception. Par conséquent, il est impossible de prévoir si les marges sur les contrôles verts peuvent compenser les dépassements des contrôles rouges.

L'incertitude résultant de la méconnaissance du modèle aéroélastique et des marges de conception se traduit dans le module *QUALIFICATION des SITES* par les résultats jaunes (*Attention*).

### Notes:

Un résultat rouge n'implique pas toujours l'inadéquation du modèle/classe choisi, en effet:

- Les dépassements et les marges se combinent pour constituer la fatigue globale qui détermine l'adéquation de l'éolienne.
- Le module estime cette fatigue globale approximativement et ne connaît pas les marges de sécurité prises par les fabricants.
- Le doute sur le niveau de fatigue global et sur l'adéquation du modèle/classe choisi ne peut être levé que par le fabricant.

## 13.5 Exportation des résultats

Tous les *Résultats (tableau)* apparaissant dans *QUALIFICATION des SITES* peuvent être copiés puis collés typiquement dans Excel.

Après avoir sélectionné la partie du tableau à copier, un clic droit fait apparaître les options *Copier sélection* et *Tout copier* qui copie tout le tableau, voir Figure 71.

Eoliennes	Classe	Direction [Deg]	Fréquence [%]	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s	13 m/s	14 m/s
Siemens SWT-2.3 IIIB	Résultat [%]		100,0	11,8	10,1	8,0	5,9	4,3	3,1	2,2
	IEC max [%]		100,0	9,1	8,1	6,9	5,7	4,5	3,4	2,2
		0	4,4	8,0	6,7	5,4	4,2	3,2	2,4	1,1
		30	5,4	9,8	8,4	6,7	5,1	3,7	2,6	1,1
		60	7,3	13,0	9,9	6,5	3,7	1,8	0,8	0,0
		90	6,8	15,3	10,0	4,9	1,8	0,5	0,1	0,0
		120	6,6	16,9	12,1	6,7	2,7	0,8	0,1	0,0
		150	7,3	15,2	11,5	7,1	3,6	1,4	0,4	0,0
		180	10,2	13,5	11,9	9,3	6,5	4,0	2,2	1,1
		210	13,4	11,9	11,4	10,1	8,3	6,3	4,4	2,2
		240	14,0	10,5	10,4	9,8	8,7	7,2	5,6	4,4
		270	12,6	9,5	9,3	8,7	7,8	6,6	5,4	4,4
		300	7,4	9,0	8,2	7,2	6,1	5,0	4,0	3,1
		330	4,6	8,2	7,1	6,0	4,9	3,8	3,0	2,2
Siemens SWT-2.3 IIIB	Résultat [%]		100,0	11,8	10,1	7,9	5,9	4,3	3,1	2,2
Siemens SWT-2.3 IIIB	Résultat [%]		100,0	11,9	10,1	7,9	5,9	4,2	3,0	2,2
Siemens SWT-2.3 IIIB	Résultat [%]		100,0	11,8	10,0	7,8	5,8	4,1	2,9	2,2

Figure 71

L'autre manière d'exporter les données et les résultats est d'utiliser la commande *Résultats calculs->fichiers*. Pour accéder à cette commande, il faut appeler le menu contextuel qui apparaît en faisant un clic droit sur le titre du rapport produit par le calcul *QUALIFICATION des SITES*, voir Figure 72.

Cette commande ouvre la fenêtre *Génération des fichiers résultats* permettant de sélectionner l'information à exporter :

- 1) Résultats des calculs WAsP (si réalisé)
- 2) Résultats des calculs WEng (si réalisé)
- 3) Statistiques et analyses faites sur les données des mesures site
- 4) Résultats des contrôles par éolienne.

Les informations 3) et 4) permettent de fournir les informations typiquement demandées par les fabricants pour une première évaluation des conditions du site.

Ces informations incluent des indications sur la qualité des mesures et sur les méthodes de contrôle utilisées.

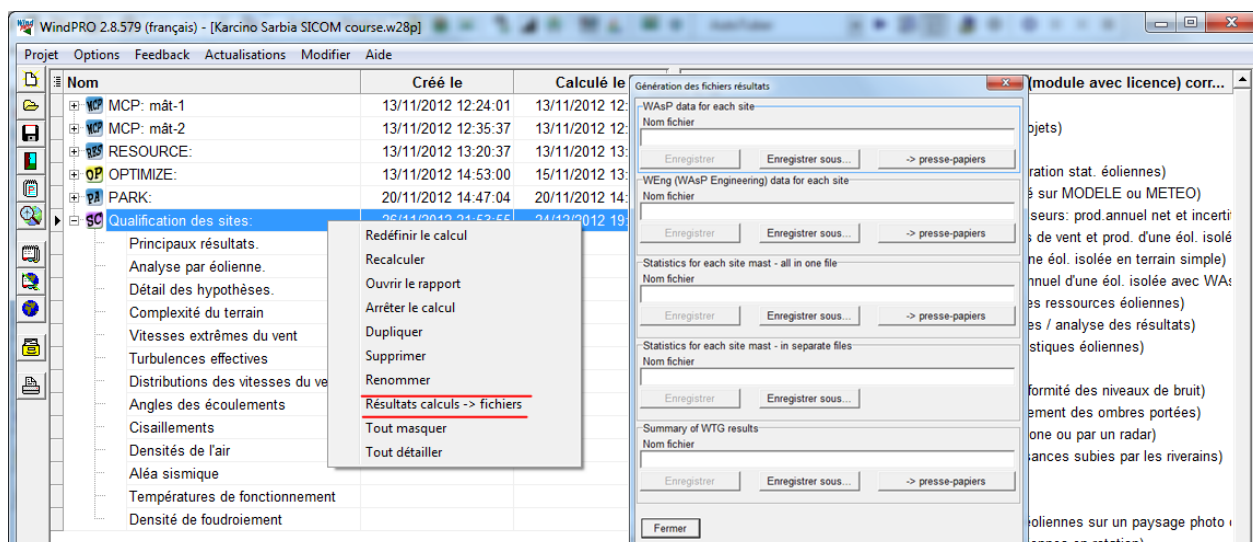


Figure 72

## 13.6 Rapports

### 13.6.0 Principaux résultats

Les *Principaux résultats* du rapport sont une synthèse globale des résultats des contrôles, voir Figure 73.

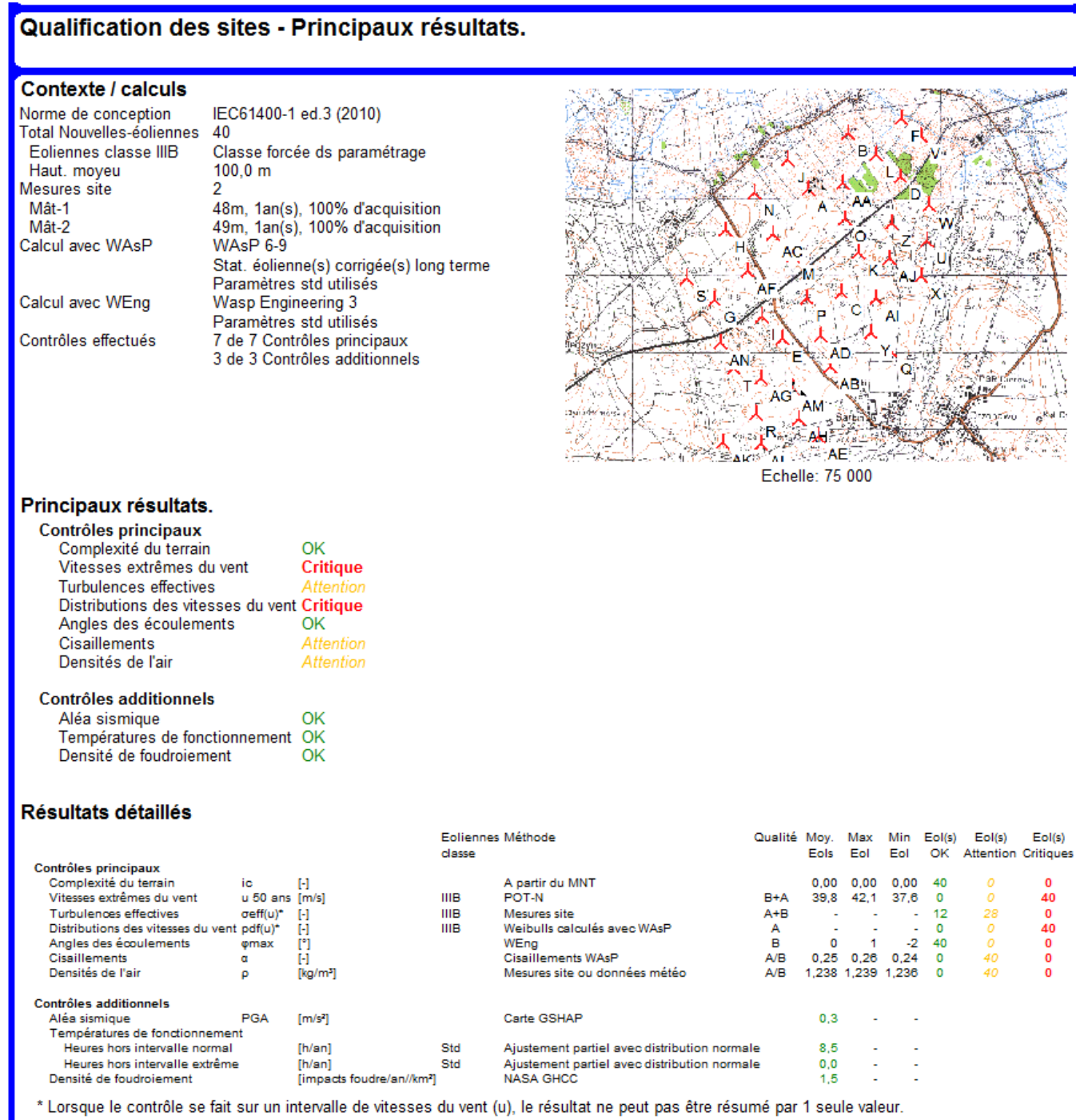


Figure 73

### 13.6.1 Résultats par éolienne

Résultats par éolienne donne le résultat de chaque contrôle pour chacune des éoliennes du projet, voir Figure 74.

Qualification des sites - Résultats par éolienne												
Contrôles principaux - Résultats par éolienne												
Qualification	Mesures sites		Objet		Données-site							
Critique	1	Mât-1	A	Données-site-1								
Attention	2	Mât-2	B	Données-site-2								
OK												
Eoliennes	Classe	Mesures site	Complexité du terrain	Vitesses extrêmes du vent [m/s]	Turbulences effectives [-]	Distributions des vitesses du vent [-]	Angles des écoulements [°]	Cisaillements [-]	Densités de l'air [kg/m³]	Globalement		
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	41,5	Attention	Critique	0	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	42,1	OK	Critique	1	0,24	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,9	Attention	Critique	1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	41,6	Attention	Critique	1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	39,1	Attention	Critique	-1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	41,4	Attention	Critique	0	0,26	1,239	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,7	OK	Critique	-1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,8	OK	Critique	0	0,25	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,8	Attention	Critique	-1	0,24	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,9	OK	Critique	1	0,25	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,8	Attention	Critique	1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	41,5	Attention	Critique	0	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,7	Attention	Critique	-1	0,26	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,6	OK	Critique	1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,9	Attention	Critique	-1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	39,0	OK	Critique	-1	0,25	1,236	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,7	Attention	Critique	1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,7	Attention	Critique	1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,3	OK	Critique	-2	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,6	Attention	Critique	-2	0,25	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,2	Attention	Critique	1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	41,8	Attention	Critique	-1	0,26	1,239	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	41,0	Attention	Critique	1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	39,9	OK	Critique	1	0,26	1,239	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,4	Attention	Critique	-1	0,26	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,5	Attention	Critique	0	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,7	Attention	Critique	0	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,7	OK	Critique	1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,4	Attention	Critique	0	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,7	Attention	Critique	1	0,26	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,0	Attention	Critique	-1	0,25	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,4	OK	Critique	-1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,7	Attention	Critique	0	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,2	Attention	Critique	-1	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,1	Attention	Critique	1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	40,2	Attention	Critique	1	0,26	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	37,6	OK	Critique	-1	0,25	1,238	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,4	OK	Critique	0	0,25	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,5	Attention	Critique	0	0,26	1,237	Critique	Critique	
Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0	IIIB	0	0,0	38,4	Attention	Critique	-1	0,25	1,238	Critique	Critique	

Figure 74



## 13.6.2 Détail des hypothèses

Détail des hypothèses résume les Conditions environnementales des éoliennes résultant des calculs faits pour les contrôles, rappelle les données de départ et les modèles utilisés, voir Figure 75.

Qualification des sites - Détail des hypothèses.									
<b>Conditions environnementales des éoliennes</b>									
		Moy.	Min	Max					
		Eols	Eol	Eol					
u 50 ans (vit. extrême)	[m/s]	39,8	37,6	42,1					
Vmoy. vent	[m/s]	7,6	7,4	7,7					
Paramètre k ('Weibulls combinés')	[-]	2,4	2,4	2,4					
I15 (ITmoy. à 15 m/s)	[-]	0,13	0,12	0,14					
<b>Classes IEC des éoliennes</b>									
		Classe IIIB							
Vréf (vent extrême)	[m/s]	37,5							
Vmoy. vent	[m/s]	7,5							
Paramètre k	[-]	2,0							
Iréf (ITmoy. à 15 m/s)	[-]	0,14							
<b>Données de vent</b>									
Nom		Utilisation	Hauteur principale [m]	Hauteurs cisaillements [m]	Durée [an(s)]	Acquisition [%]	Autres grandeurs	Objet Données-site	
Mât-1		Mesures site	48,0	48,0;24,0	1,0	100,0		TI,T Données-site-1	
Mât-2		Mesures site	49,0	49,0;24,0	1,0	100,0		TI, Données-site-2	
MERRA_basic_E15.335_N54.000		Données long terme	50,0		30,7	99,9			
KOSZALIN_SYNOP_12-105_N54.200_E16.150 (13)		Données climatiques	10,0		13,0	63,0		T	
<b>Paramètres WAsP</b>									
WAsP 6-9									
Paramètres WAsP standards utilisés									
Objet Données-site									
Données-site-1									
Données-site-2									
<b>Paramètres WAsP Engineering</b>									
Wasp Engineering 3									
Secteurs 12									
Vent géostrophique réduit h=10m, z0=0,05m, u=20m/s									
Calcul Etendue: 6000m, Résolution: 50m, Points N-S: 322, Points E-O: 304									
Modèle de turbulence Kaimal									
Objet Données-site Données-site 12 secteurs; Rayon: 20 000 m (4)									
<b>Correction long terme</b>									
WAsP utilise des statistiques éoliennes corrigées long terme.									
<b>Eoliennes</b>									
UTM WGS84 Fuseau: 34				Courbe de puissance					
	Est	Nord	Z	Fabricant	Type	P nominale [kW]	Diamètre rotor [m]	Etablie par	Nom
			[m]						
A	134 450	6 011 521	13,2	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2 300	113,0	EMD	Level 0 -- Standard setting 0dB -
B	135 000	6 012 221	11,3	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2 300	113,0	EMD	Level 0 -- Standard setting 0dB -
C	134 800	6 010 171	20,0	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2 300	113,0	EMD	Level 0 -- Standard setting 0dB -
D	135 650	6 011 621	7,3	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2 300	113,0	EMD	Level 0 -- Standard setting 0dB -
E	134 000	6 009 621	20,0	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2 300	113,0	EMD	Level 0 -- Standard setting 0dB -
F	135 700	6 012 371	0,5	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2 300	113,0	EMD	Level 0 -- Standard setting 0dB -

Figure 75

### 13.6.3 Résultats détaillés des contrôles

Le rapport présente les résultats détaillés de chaque contrôle effectué. La présentation comprend le rappel de la *Méthode utilisée* et des *Méthodes disponibles*, les résultats sous forme de tableau et sous forme graphique. Les figures 76 et 77 montrent les résultats détaillés du contrôle des *Vitesses extrêmes du vent* (composés de deux pages en l'occurrence).

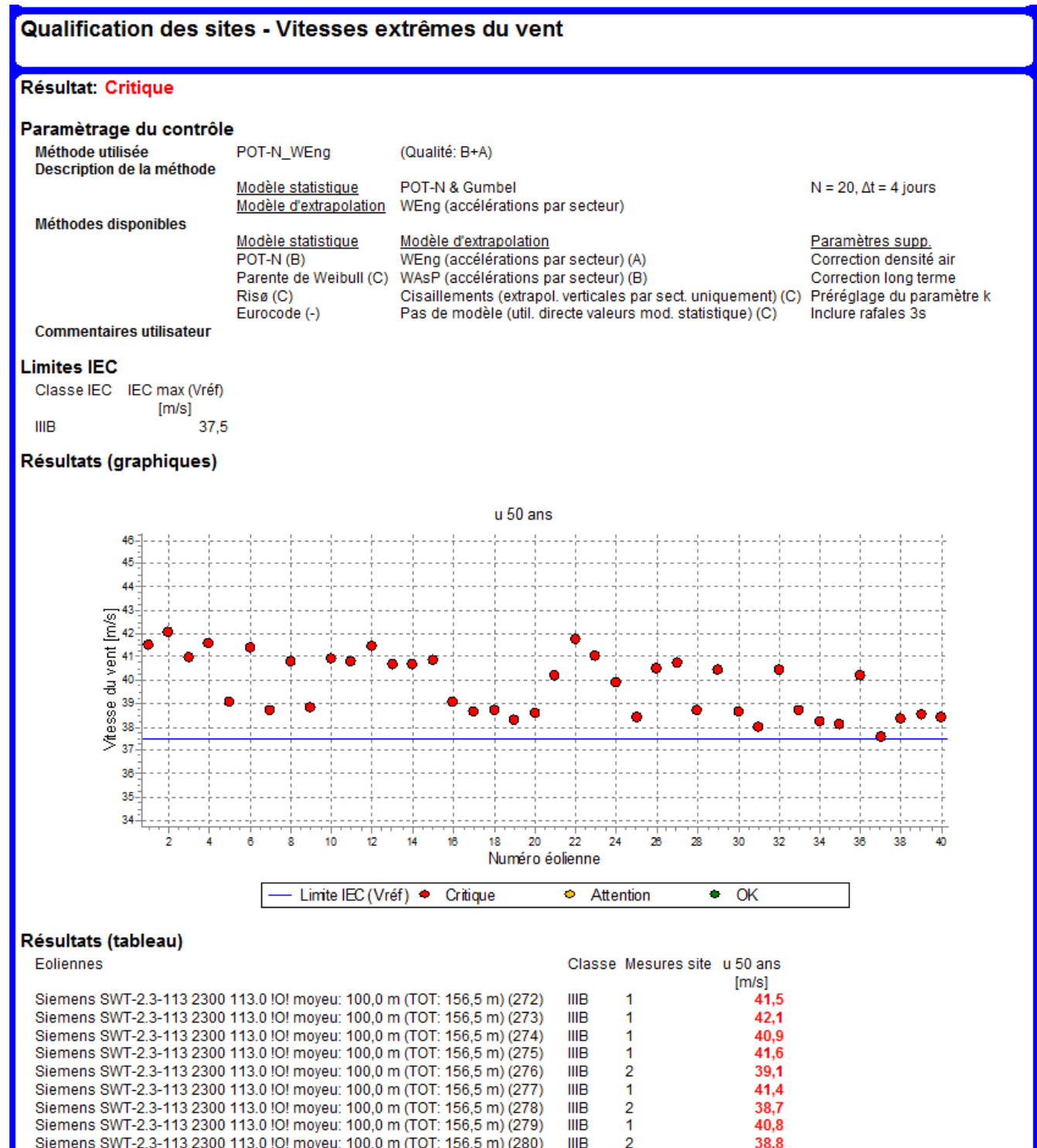


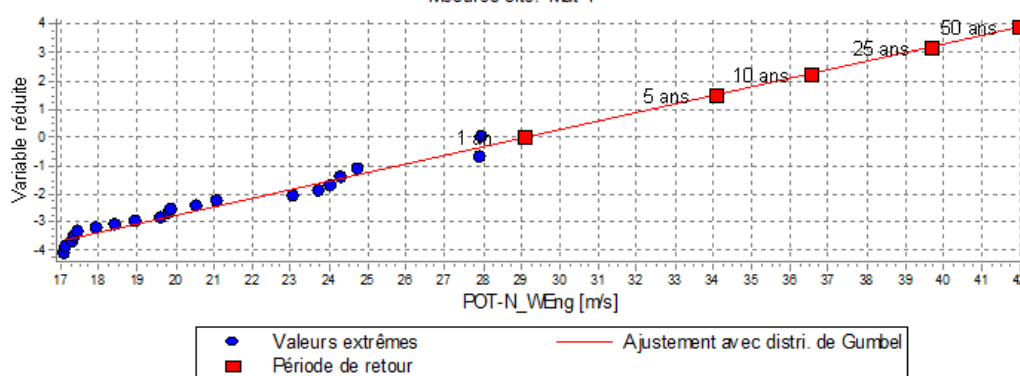
Figure 76

## Qualification des sites - Vitesses extrêmes du vent

### Ajustement avec distri. de Gumbel

Siemens SWT-2.3-113 2300 113.0 10! moyen: 100,0 m (TOT: 156,5 m) (273)

Mesures site: Mât-1



### Valeurs extraites

Mât-1

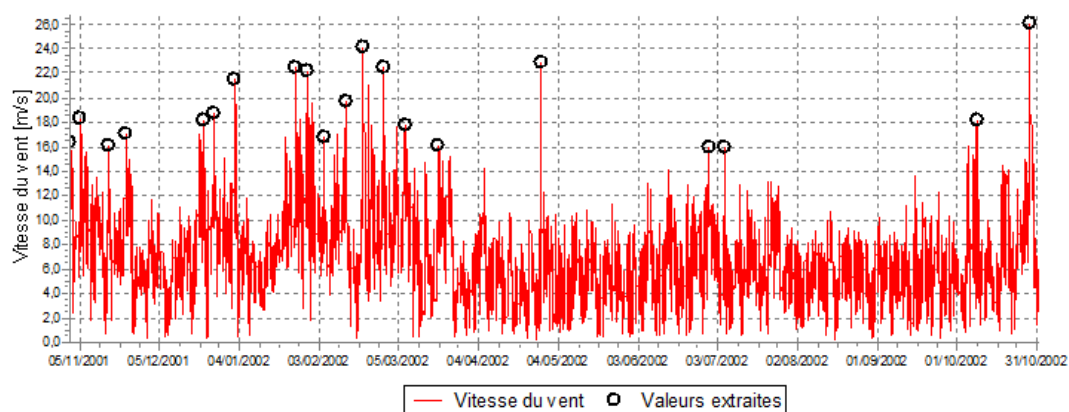


Figure 77

Les résultats des autres contrôles sont constitués de manière identique mais ne sont pas présentés dans ce document.

---

## 13.7 Bibliographie

- [1] IEC 61400-1 ed. 3, 2005, Wind turbines – Part 1: Design requirements.
- [2] IEC 61400-1 ed. 3, 2010, Amendment 1.
- [3] Gumbel, E., 1958, Statistics of Extremes, Columbia University Press.
- [4] Abild, J., Andersen, E. Y. and Rosbjerg, D., 1992, The Climate of Extreme Winds at the Great Belt, Denmark, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 41-4, p. 521-532.
- [5] Cook, N., 1982, Towards better estimation of extreme events, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 9, p. 295-323.
- [6] Makkonen, L., 2007, Problems in the extreme value analysis, *Structural Safety*, vol. 30, p. 405-419.
- [7] Winklaar, D. (ed.), 1998, *European Wind Turbine Standards II, part I: Load Spectra and Extreme Wind Conditions*.
- [8] Bergström, H., 1992, DISTRIBUTION OF EXTREME WIND SPEED, *Wind Energy Report WE 92:3*, Department of Meteorology, Uppsala University.
- [9] Larsén, X. G. and Mann, J. 2009, Extreme winds from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Wind Energy*, vol 12, p556-573. DOI: 10.1002/we.318.
- [10] Svenningsen, L. et al., 2010, An Index-like correction to reduce uncertainty of extreme wind estimates from short-term data, Proceedings of the European Wind Energy Conference.  
<http://ewec2010proceedings.info/proceedings/index2test.php?page=info2&id=6&id2=326&ordre=19&tr=&searchin=&what=&searchtext=&day=1&top=&fil1=&fil2=&fil2&ord1=&sess=>
- [11] Unpublished Monte Carlo study of extreme wind estimation presented at Vindkraftnet meeting at Risø/DTU 2010.
- [12] Cook, N. J., 1990, The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Butterworths. (Book)
- [13] Frandsen, S. T., 2007, Turbulence and turbulence generated loading in wind turbine clusters, Risø report R-1188.
- [14] Nielsen, M., WAT tool Help file, 2011, Risø/DTU.
- [15] Nielsen, M., Jørgensen, H. E. and Frandsen, S. T., 2009, Wind and wake models for IEC 61400-1 site assessment, Proceedings of the European Wind Energy Conference (EWEC 2009).I
- [16] Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. M. and Zhang, P., 2003, The GSHAP Global Seismic Hazard Map. In: Lee, W., Kanamori, H., Jennings, P. and Kisslinger, C. (eds.): International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, International Geophysics Series 81 B, Academic Press, Amsterdam, 1233-1239.
- [17] NASA, Global Hydrology and Climate Center. <http://thunder.nsstc.nasa.gov/data/index.html>.
- [18] Troen, I. and Petersen, E. L., 1989, European Wind Atlas, Risø National Laboratory. (Book)

## 13.8 Annexe-1 - Gumbel's Theory of Extremes and more

Emil J. Gumbel's model of extremes published in "Statistics of Extremes" [3] in 1958 is the classical standard model for describing the statistics of extreme events. The model is also called Fisher-Tippett Type 1 asymptote or Generalized Extreme Value model (GEV) type 1. The Gumbel model describes the distribution function of annual extremes, i.e. the cumulative probability,  $G(u)$ , that a yearly maximum wind speed of  $u$  is not exceeded and takes the form:

$$G(u) = e^{-e^{-(u-\beta)/\alpha}}$$

Where the parameters  $\beta$  and  $\alpha$ , are called mode and dispersion or sometimes location and scale.

There is a simple relation between the Gumbel distribution of annual extremes and the cumulative mean distribution of all wind speeds samples,  $F(u)$ . The mean distribution, also called the parent distribution, is typically assumed to be Weibull. The simple relation states that the probability that a given extreme wind speed is the largest among  $N$  samples is given as the cumulative parent distribution multiplied by itself  $N$  times. For large  $N$  the exact distribution of annual extremes converges asymptotically to the Gumbel distribution:

$$G(u) = e^{-e^{-(u-\beta)/\alpha}} \approx F(u)^N$$

The error of using the Gumbel asymptote is related to the number of independent samples in a year as well as the  $k$ -parameter of the Weibull parent distribution (i.e. the tail behaviour). For lower  $k$ -parameters the rate of convergence (i.e. more accurate already for small  $N$ ) is much faster than for higher  $k$ -factors. It is also important to note that all  $N$  samples are assumed to be independent, i.e. not correlated. In real life this is not the case for all 10-minute or hourly wind speed samples in a year. The demand for independence leads to considerable complexity. Thus, usually the Gumbel distribution is not estimated from the parent distribution, but rather, directly from extracted extreme samples of the time series and then combining these with theoretical estimates of the cumulative probability of non-exceedance ( $P_i \approx G(u_i)$ ) called "plotting positions". A Gumbel distribution is then fitted to ( $u_i, P_i$ ) to obtain the Gumbel distribution parameters,  $\alpha$  and  $\beta$ .

In the original Gumbel approach the annual maximum samples ( $u_i$ ) are extracted for each year of an  $N$  year time series. These extreme samples are then ranked ( $i$ ) smallest to largest ( $i$  equals 1 to  $N$ ) and attributed the plotting positions,  $P_i$ , the theoretical estimates of the cumulative distribution function, approximating the probability that the annual maximum wind speed  $u_i$  is not exceeded. Several formulas for plotting positions have been suggested. The original Gumbel formula is:

$$P_{i,classic} = \frac{i}{N+1} \approx G(u_i)$$

which in fact was introduced by Weibull (Makkonen, 2004) [6].

An alternative plotting position is due to Hazen (Makkonen, 2004) [6], which is used in the extreme wind plots in for example, most Risø/DTU software (e.g. WASP Engineering):

$$P_{i,Hazen} = \frac{i-0.5}{N}$$

The extreme wind speed samples,  $u_i$ , are then plotted on the x-axis versus a transform of the chosen  $P$ -values, called the reduced variate,  $y$ :

$$y_i = -\ln(-\ln(P_i))$$

With this transform the Gumbel asymptote takes a very convenient linear form:

$$y = -\ln(-\ln(G(u))) = au+b = \frac{1}{\alpha}u - \frac{\beta}{\alpha}$$

Thus, a linear fit to a plot of ( $u_i, y_i$ ) provides the parameters of the Gumbel distribution.

The IEC design criterion for extreme wind speed is a 50-year event, where "50" is referred to as the return period. In other words the design criterion is the wind speed that is expected to occur only once in 50 years. The return period is related to the annual risk of exceedance ( $R$ ) via:

$$R(u_T) = 1 - G(u_T) = \frac{1}{T}$$

Thus, for T=50 years the annual risk of exceedance is R=2%, which is a much more stringent and basic definition of the design criterion than "50 years return period".

Once the Gumbel parameters,  $\alpha$  and  $\beta$ , have been obtained from a linear fit to  $(u_i, y_i)$  the extreme wind estimate for T=50 years (i.e. R=2%) may be obtained from:

$$u(T) = \alpha y(T) + \beta = \alpha \left( -\ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) + \beta$$

Where  $y(T=50)$  equals 3.9. Thus, to obtain the estimate of the 50-year wind speed, the linear Gumbel fit of  $(u_i, y_i)$  must be extrapolated to  $y=3.9$ .

#### *Implicit assumptions in the choice of "plotting positions"*

The plotting position associated to each of the extracted extremes is a theoretical estimate of the annual probability that this wind speed is not exceeded. As such this probability also implies an assumption of the return period of the highest of the extracted wind speeds.

For the classical Gumbel plotting position the max wind speed extracted is assumed to have a return period of:

$$T_{max} = \frac{1}{1 - P_{max}} = \frac{1}{1 - \frac{N}{N+1}} = N + 1$$

Using the Hazen plotting positions the same max wind speed is assumed to have the return period:

$$T_{max} = \frac{1}{1 - P_{max}} = \frac{1}{1 - \frac{N-0.5}{N}} = 2N$$

As example with 10 years of data (i.e. N=10) employing the classical Gumbel plotting positions relies on the assumption that the overall maximum wind speed recording has a return period of 11 years. For the Hazen plotting positions the assumed return period is 20 years. A more extreme example is a time series of 25 years. Using the Hazen estimates assumes the max recording to have a return period of 50 years. Thus, it is obvious that the Hazen plotting positions are much less conservative than those of the classical Gumbel method.

#### *Extreme wind speed estimate at return period 1 year*

The IEC standard also mentions that the extreme wind speed for T=1 year must be estimated although it is not used directly in the extreme wind check. However, the exact expression above for  $y(T)$  is not defined for T=1 year. Instead the most likely extreme to encounter any given year is usually chosen as the most appropriate estimate; this value equals the **mode** of the Gumbel distribution, i.e. the parameter  $\beta$  from the linear fit (which does not exactly equal the mean as the distribution is not symmetric). So we employ the definition of the extreme wind estimate with return period of 1 year as:

$$u(T = 1) \equiv \beta$$

This definition is consistent with the equation derived using a Poisson process (see for example, [4]).

#### **Fitting the Gumbel asymptote**

The linear fit to  $(u_i, y_i)$  described above represents is the basis of Gumbel's asymptotic model of extremes. However, this linear fit may be performed in various ways. Firstly it is worth noting that the fit is performed on  $(u_i, y_i)$ , i.e. with the reduced variate as the dependent variable. The reason for this is the implicit assumption in the standard least-squares fitting routine that the dependent variable (here,  $y$ ) has much higher uncertainty than the independent one ( $u$ ). The argument is that the wind speeds are measured using high quality equipment whereas  $y$  (reduced variate) is a transform of a theoretical estimate of the annual probability of each wind speed not being exceeded, which is associated with considerable uncertainty.

The standard fit is performed using the least-squares method. Monte Carlo simulations (not published) have shown that typically this fit introduces a slight conservative bias.

An alternative fit is done using the Probability Weighted Moments, PWM (Abild, 1992) [4] which only takes the ranked wind speeds as input, and, hence, does not utilize the reduced variate. In this way the PWM fit avoids the main source of method-induced bias. The PWM expressions for the fit parameters to the Gumbel asymptote, scale ( $\alpha$ ) and location ( $\beta$ ) are:

$$\alpha = \frac{2b_1 - b_0}{\ln(2)} \quad \text{and} \quad \beta = b_0 - 0.5772\alpha$$

With estimates of the sample probability weighted moments given as:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad \text{and} \quad b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{i-1}{N-1} u_i$$

Monte Carlo simulations (not published) have shown that the PWM fit to the Gumbel asymptote does not introduce a bias in the Gumbel fit. Unfortunately, the PWM fit does not work equally well with all the ways of extracting the extreme samples. It seems that PWM only is only bias-free for the traditional Gumbel approach where only the annual extremes are extracted.

### Annual maximum method (AM)

The traditional Gumbel method only extracts the most extreme sample of each year, or from alternatively the most extreme sample of each period of fixed length sub-dividing the time series. Hence, the method is referred to as the Annual Maximum method (AM) or Periodical Maximum method.

The drawback of the AM method is the requirement of relatively long time series for the fit to the Gumbel asymptote to be meaningful. Typically, at least 5-10 years is recommended to constrain the fit parameters reasonably well.

In SITE COMPLIANCE at least 5 years of data are required for the AM method to be available.

#### Fit

The PWM fit is used with the AM method as it guarantees the least bias in the fitting. Since the PWM fit does not require plotting positions no Gumbel plot is needed. But is used for visual presentation, however.

### Peak-Over-Threshold method (POT)

In some applications this method is also referred to as method independent storms. In most applications 5-10 years of on-site measurements are rarely available and within each year there may be more than one significant storm event. Hence a group of extreme wind methods have been developed which utilize more than a single storm from each year. These methods are referred to as Peak-Over-Threshold methods. Storms are typically extracted by defining a high threshold to select only high wind events which exceed this threshold. To ensure that the storm events are statistically independent events a minimum time difference is required between the extracted events, typically a few days. The extracted extreme samples may then be analysed in a way very similar to that of the standard AM Gumbel approach.

Normally, the recommendation for POT methods is given as the number of events to be extracted as 20-50 extremes. This makes the selection of a proper threshold an iterative procedure. As a more efficient way of extracting the extreme samples in SITE COMPLIANCE we have introduced a variation of the POT method which we call POT-N. Instead of defining a threshold the wished number of extremes is defined directly and the program then internally selects the proper threshold to obtain this number of extremes.

As in the AM method the extracted extreme samples are ranked and the "plotting position" ( $P_i$ ) is attributed to each of the extracted extremes, i.e. the theoretical estimate of the probability of not being exceeded. For POT-N we have decided to use the classical Gumbel plotting positions in SITE COMPLIANCE

Instead of a "storm rate" of just one storm/year as in the AM method the storm rate is  $\lambda$  storms/year in a POT-estimation. Thus, a direct Gumbel fit to the extracted extremes would not yield the distribution of annual extremes, but simply the distribution of the extracted storms. To compensate for this the plotting positions,  $P_i$ , may be raised to the  $\lambda$ th power provides an estimate of the PDF of the annual extremes (see Cook, 1982 [5]). This transformation is equivalent to a simple shift on the y-axis, i.e. the standard reduced variates are shifted by  $\ln(\lambda)$ :

$$y_{annual} = y_{storm} - \ln(\lambda)$$

After this transform the POT Gumbel plot is fully equivalent to the AM plot, with  $y_{annual} = 3.9$  for  $T=50$  years.

#### Fit

Our studies have shown that the PWM fit does not work well for the POT method as for the AM, unfortunately. Instead, a linear least squares fit to the  $(u,y)$  is used. The classical Gumbel plotting positions are used as the implicit assumption of return period of the max wind recording seems more sensible than for the Hazen plotting positions.

**Weibull parent (EWTS/Bergström) method**

The occurrence of high extreme events is closely linked to the tail behaviour of the wind speed distribution. The heavier the tail the more likely are high extreme events to occur. For Weibull distributions commonly adopted in wind energy the shape of the tail is determined by the Weibull shape or k-parameter. A lower k-parameter means a heavier tail and that extreme events are more likely.

This effect has been quantified in the European Wind Turbine Standard (EWTS) that includes a method for extreme wind estimation based on the "Parent"-distribution in this case the Weibull distribution. The method simply assumes a universal number of independent extremes per year (N). The so-called "exact distribution" of the annual maximum is then obtained by raising the Weibull cumulative distribution function to the power of this number, N.

There is an error in the EWTS publication in the number of independent samples which they set to 23037 per year with reference to Bergström (1992) [8]. However, in Bergström (1992) [8] the correct number for 10-minute data is  $n=2302$  independent samples per year, or around every 20<sup>th</sup> 10-minute sample. For hourly-averaged data the number is 883 or approximately every 10<sup>th</sup> hourly sample. The error arises due to an exponent of effective frequency which is incorrectly transferred a factor of 10 in EWTS.

The slope and offset of the Gumbel asymptote (for high n) to the "extracted distribution" of annual extremes are given as (Bergström, 1992 [8], EWTS, 1998 [7]):

$$\alpha = \frac{A}{k} [\ln(n)]^{1/k-1}$$

$$\beta = A [\ln(n)]^{1/k}$$

The difference between the "exact" and Gumbel asymptote is not significant, and working with the Gumbel asymptote allows a fully consistent plotting with the other extreme wind estimation methods.

*Omni-directional or sector-wise*

The EWTS/Bergström method requires omni-directional Weibull parameters. In the WAsP context Weibull parameters are sector-wise, which is much more realistic and allows for multimodal omni-directional total distribution (several peaks). However, an omni-directional Weibull distribution called "Combined" may be estimated from the sector-wise Weibulls according to the method in the European Wind Atlas [18].

*Fit - is the WAsP Weibull fit appropriate for extreme wind estimation?*

The WAsP-type Weibull fit, fits exactly the third moment (energy) and frequency above the mean speed of the table data (no power curve or truncation is applied). Thus, the WAsP fit has a very strong emphasis on the tail behaviour. This is in contrast to ordinary least-squares or maximum-likelihood fits, that fit the wind speeds (and not the energy). These fits tend to fit well around the mean where the highest frequencies of occurrence are, at the cost of reproducing the tail behaviour less well. In conclusion, the WAsP Weibull-fit is in fact better than most other fits at reproducing the right tail behaviour, which is of main importance in extreme wind estimation.

**Preconditioning**

The Gumbel distribution is an asymptotic distribution. As the number of independent (i.e. not correlated) samples in the pool from which the extremes are extracted, e.g. 1 year, approaches infinity, the Gumbel asymptote becomes exact. The accuracy of the asymptotic assumption depends on the number of independent samples but also on the shape of the parent distribution, i.e. the Weibull distribution. For a k-parameter of 1, the convergence is extremely fast and the asymptote practically exact for just few samples. For higher k-factors the convergence is much slower (see Cook, 1982 [8]).

The deviation of the true annual extreme distribution from the Gumbel asymptote is a slight curvature of the extreme samples when plotting the reduced variate, y, on the y-axis versus wind speed on the x-axis. This curvature will be curved downwards (i.e. concave) and generally results in a conservative fit (over-estimation) which is further exaggerated upon extrapolation to high return periods like 50 years ( $y=3.9$ ) and higher.

A possible solution is to precondition the data before fitting the slope and offset. The wind speeds are transformed so that the parent distribution becomes a Weibull with a k-parameter of 1 for which the convergence is extremely fast and thus the Gumbel approximation always very good (Cook, 1982 [8]). To achieve this, the wind speeds of the extreme samples are simply raised to the power of k, where k is the parent Weibull distribution. Often  $k=2$  is used as a common assumption in wind energy. In addition using  $k=2$  makes the transformed wind speeds proportional to the dynamic pressure, related to the thrust exerted by the wind. However, the real argument for preconditioning is purely statistical and is illustrated in the graphs below.



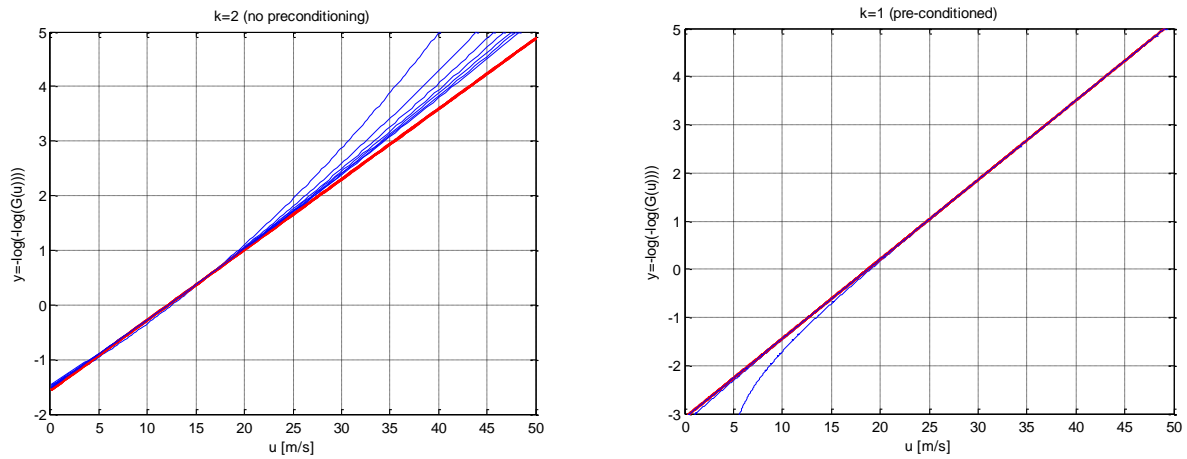


Figure 1. Illustration of the asymptotic nature of the Gumbel model. In the both graphs blue curves show the exact distribution for an annual number of independent samples of  $N=10^1$  to  $10^7$  in steps of 10. Red curves show the Gumbel asymptote assuming  $N$  is infinite (hidden behind the blue curves on the right graph). Note that as  $N$  increases the blue curves converges to the red. Left graph illustrates the situation for  $k=2$  and the right graph for  $k=1$ , which is equivalent to using preconditioning.

## 13.9 Annexe-2 - Frandsen Effective turbulence model

The following text describes the main assumptions and steps in the implementation of the Frandsen model or Effective turbulence model. Most assumptions are directly specified in the IEC standard [1, 2] or in Frandsen's original publication [13].

The Frandsen model [1, 2, 13] defines the so-called effective turbulence as a combination of ambient and wake generated turbulence integrated over all directions in a way that accounts for accumulation of fatigue using material properties. In the edition specified in the IEC61400-1 ed. 3 2010 amendment [2], the effective turbulence is calculated using the 90th percentile of ambient turbulence.

The illustration below gives a simplified overview of the calculation steps of effective turbulence for a WTG.

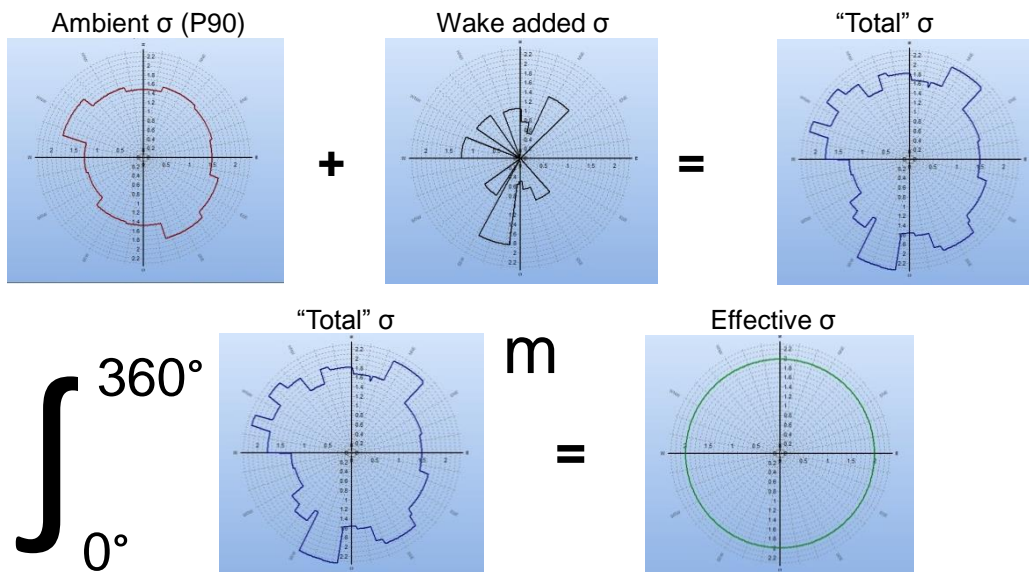


Figure 1. Simplified illustration of the main calculation steps in the Frandsen effective turbulence model.  $m$  is the material parameter Wöhler exponent.

For each WTG position in the calculation the Frandsen model needs the following input:

1.  $\hat{\sigma}(\theta, u)$  and  $\hat{\sigma}_{\sigma}(\theta, u)$  - Ambient turbulence (mean & st.dev. functions of direction and speed)
2.  $W(A_i, k_i)$  &  $f(\theta_i)$  - Sector-wise frequencies and Weibull distributions
3.  $C_T$  (turbine thrust curve) and park geometry
4.  $m$  - Relevant material fatigue property "Wöhler exponent"

Input 1 is used to calculate the ambient characteristic turbulence, i.e. the 90th percentile.

Input 2 is used to calculate the directional wind speed distribution conditioned on wind speed.

Input 3 is used to calculate the wake generated contribution to turbulence.

Input 4 is used in the fatigue weighted combination model of single directions to obtain an omnidirectional effective turbulence as a function of wind speed only.

A main decision in SITE COMPLIANCE regarding the implementation of the Frandsen has been working directly with standard deviations of wind speed ( $\sigma$ ) instead of turbulence intensity (TI) which is more common. There are several arguments supporting this decision. Firstly, Frandsen's original publication [13, p. 84] states directly that "The model is expressed in terms of standard deviation of wind speed fluctuations rather than turbulence intensity. Secondly, a fundamental assumption in Frandsen's model is that loads are proportional to  $\sigma$ , the standard deviation of wind speed. Thirdly, the variation of  $\sigma$  with wind speed assumed in the IEC design limit ("Normal turbulence model") is linear for  $(u, \sigma)$ , but not for  $(u, TI)$ .

The implementation of Frandsen's model as specified in [1, 2] includes on a number of assumptions and calculation steps. The main assumptions in the SITE COMPLIANCE implementation are (most are directly given in the standard [1, 2]):

- “No reduction of mean wind speed inside the wind farm shall be assumed” (no wake deficit!) [1, 2]
- Only wake from nearest neighbour WTG considered i wakes overlap [1, 2]
- Turbulence structure correction is applied to both  $\sigma$  and  $\sigma_c$
- Wakes have a fixed angular width of 22° independent of distance [13, 15]

The main steps in the calculation of effective turbulence (as illustrated in figure 1) are:

- “Total” turbulence ( $\sigma_T$ ) is calculated in each direction combining measured 90th percentile of ambient turbulence ( $\sigma_c$ ) and calculated wake added turbulence ( $\sigma_{wake}$ ) [1, 2] - “^” indicates measured data:

$$\hat{\sigma}_T = \sqrt{\sigma_{wake}^2 + \hat{\sigma}_c^2}$$

where

$$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma} + 1.28\hat{\sigma}_\sigma \quad (90\text{th percentile of ambient turbulence})$$

and

$$\sigma_{wake} = \begin{cases} 0 & \text{If overall nearest neighbour distance is } > 10RD \\ \frac{u}{1.5 + \frac{0.8d/RD}{\sqrt{C_T(u)}}} & \text{In wake affected directions} \end{cases}$$

d is distance and  $C_T$  is thrust coefficient

- “Effective turbulence” is calculated from “Total turbulence” raised to the power of m (Wöhler exponent) and integrated (numerically) over all directions weighted by its relative frequency (f):

$$I_{eff.}(u) = \frac{1}{u} \left[ \int_0^{2\pi} \hat{\sigma}_T(\theta | u)^m f(\theta | u) d\theta \right]^{1/m}$$

The Frandsen model requires a “large wind farm correction” when certain conditions are met, but [1, 2] only considers the special case of a regular rectangular layout. In SITE COMPLIANCE a more general sector-wise version of this large wind farm correction has been implemented. For each sector the following evaluation is performed:

- If >5 neighbour WTGs in a sector, the sector is a “large wind farm sector”:
  - In direct wake directions  $\sigma_T$  is calculated as above (no correction of ambient level) [1, 2]
  - In non-wake directions (>10RD), ambient  $\sigma_c$  is adjusted using [1, 2]:

$$\sigma_c = \frac{1}{2} (\sqrt{\hat{\sigma}_w^2 + \hat{\sigma}^2} + \hat{\sigma}) + 1.28\hat{\sigma}_\sigma$$

where

$$\hat{\sigma}_w = \frac{0.36u}{1+0.2 \sqrt{\frac{d_r d_f}{C_T}}} \approx \frac{0.36u}{1+0.2 \sqrt{\frac{0.5\Delta\theta d_{max}^2}{N_{sec} C_T}}}$$

The latter fraction on the right in the above equation was proposed in [15] as a more generally applicable version of the fraction on the left which is given explicitly in the standard, covering only regular rectangular layouts). The square root argument represents a “thrust versus area”. In the fraction on the right the rectangular expression is replaced with an angular expression with the area of an “pie slice”  $A = 0.5\Delta\theta d_{max}^2$ .  $N_{sec}$  is the number of WTGs within the “slice” or sector,  $d_{max}$  the radius of the slice and thus distance to the furthest neighbour WTG in the sector.

## Calculation of Equivalent effective turbulence (not part of the IEC standard)

This calculation is not part of the IEC standard, but is based on considerations presented in Frandsen's original paper [13]. The Equivalent effective turbulence is used to decide when the calculated Effective turbulence exceeds the IEC design limit to evaluate if this exceedance is critical or not. The main assumption is the same as in the Frandsen model, but an extra calculation step is added: integrating the effective turbulence over all relevant wind

speeds where Frandsens model only integrates over directions. This second integration over wind speeds assumes that the sensitivity of the WTG to wind speed fluctuations is constant for the relevant wind speed range which is a significant extension to the approximation of the Frandsen model and further validation of this approximation is ongoing. The Equivalent effective turbulence is calculated as following:

$$\sigma_{eq} = \left( \int_{u_1}^{u_2} \sigma_{eff.}(u)^m f(u) du \right)^{1/m}$$

Where  $m$  is Wöhler exponent,  $f(u)$  is total frequency of a wind speed bin (omnidirectional) and  $\sigma_{eff.}(u)$  is effective turbulence as a function of wind speed bin, i.e. the result from the Frandsen models effective turbulence calculation.

The effective turbulence result for a particular WTG is compared the IEC design limit for the WTG class by calculating the equivalent effective turbulence for the relevant IEC design class (turbulence and frequency values) and for the actual WTG results. These results for the actual WTG result are normalized by the result for the IEC class. If the normalized result (ratio) exceeds 1 the IEC exceedance is considered critical. The integration limits are set to match the IEC check interval.

## 13.10 Annexe-3 - Critères déterminant les qualifications Ok, Attention et Critique.

Les critères utilisés pour qualifier un résultat sont présentés à la suite. Ils se fondent sur l'expérience accumulée au cours d'un grand nombre de projets et sont affinés en permanence.

### Critères généraux :

Le résultat d'un contrôle est vert/*Ok* s'il respecte strictement les limites IEC. Si le résultat est hors des limites IEC, il peut être orange/*Attention* ou rouge/*Critique* en fonction de l'importance du dépassement des limites.

Eoliennes :

- Une éolienne reçoit l'attribut *Critique* dès qu'un seul des résultats est *Critique*, *Attention* dès qu'un seul des résultats est *Attention* et *Ok* uniquement si tous les résultats des contrôles sont *Ok*.

Park éolien :

- Le résultat d'un contrôle est qualifié de *Critique* dès que ce contrôle est *Critique* sur une seule éolienne, d'*Attention* dès que ce contrôle est *Attention* sur une seule éolienne et de *Ok* si le résultat de ce contrôle est *Ok* sur toutes les éoliennes.

### Critères par type de contrôle :

#### Complexité du terrain ( $I_c$ ) :

- Limite IEC : aucune
- *Critique* : jamais
  - *Attention* : si  $I_c > 0$
  - *Ok* : si  $I_c = 0$

#### Cisaillements ( $\alpha$ ) :

- Limites IEC :  $0 \leq \alpha \leq 0,2$
- *Critique* : si  $\alpha > 0,3$  or  $\alpha < 0$
  - *Attention* : si  $0,3 \geq \alpha > 0,2$
  - *Ok* : si  $0 \leq \alpha \leq 0,2$

#### Densités de l'air ( $\rho$ ) :

- Limites IEC : l'hypothèse de conception des éoliennes avec  $1,225 \text{ kg/m}^3$
- *Critique* : jamais
  - *Attention* :  $\rho > 1,225 \text{ kg/m}^3$
  - *Ok* :  $\rho \leq 1,225 \text{ kg/m}^3$

#### Angles des écoulements ( $\varphi_{\max}$ ) :

- Limites IEC :  $\varphi \leq 8^\circ$  &  $\varphi \geq -8^\circ$
- *Critique* :  $\varphi > 12^\circ$  or  $\varphi < -12^\circ$
  - *Attention* :  $12^\circ \geq \varphi > 8^\circ$  or  $-12^\circ \leq \varphi < -8^\circ$
  - *Ok* :  $\varphi \leq 8^\circ$  &  $\varphi \geq -8^\circ$

#### Vitesses extrêmes du vent ( $u_{50y}$ ) :

- Limite IEC :  $V_{\text{ref}} \geq u_{50y}$
- *Critique* :  $u_{50y} > V_{\text{ref}}$  ou rafale  $> 1,4 * V_{\text{ref}}$
  - *Attention* : Never
  - *Ok* :  $V_{\text{ref}} \geq u_{50y}$  ou  $1,4 * V_{\text{ref}} \geq \text{rafale}$

Turbulences effectives ( $\sigma_{\text{eff}}(u)$ ) :

- Limites IEC :  $\sigma_1(u) > \sigma_{\text{eff. WTG}}(u)$  pour toutes les vitesses  $u$  du vent
- Critique :  $\sigma_{\text{eq, WTG}} > \sigma_{\text{eq, IEC}}$
  - Attention :  $\sigma_{\text{eq, WTG}} < \sigma_{\text{eq, IEC}}$
  - Ok :  $\sigma_{\text{eff, IEC}}(u) > \sigma_{\text{eff. WTG}}(u)$  pour toutes les vitesses  $u$  du vent
- WTG = éolienne

$\sigma_{\text{eq, XXX}}$  est la turbulence effective *Equivalente* à l'éolienne compte tenu de sa classe IEC. Le calcul de cette grandeur est expliqué dans l'Annexe-2.

Distributions des vitesses du vent (pdf(u)) :

- Limite IEC :  $f_{\text{IEC}}(u) > f_{\text{WTG}}(u)$  pour toutes les vitesses  $u$  du vent
- Critique :  $F_{hi} < 0$  or  $(F_{hi} + F_{lo} < 0)$
  - Attention :  $F_{hi} \geq 0$  &  $(F_{hi} + F_{lo} \geq 0)$
  - Ok :  $f_{\text{IEC}}(u) > f_{\text{WTG}}(u)$  pour toutes les vitesses  $u$  du vent

où:

$$F_{hi} = \int_{0.3V_{ref}}^{0.4V_{ref}} (f_{IEC}(u) - f_{WTG}(u)) du$$

$$F_{lo} = \int_{0.2V_{ref}}^{0.3V_{ref}} (f_{IEC}(u) - f_{WTG}(u)) du$$

- Ici, l'élément déterminant est le fait que les dépassements aux vitesses basses du demi-intervalle de contrôle ne sont pas aussi pénalisantes que ceux aux vitesses hautes du demi-intervalle de contrôle où les efforts que doivent supporter les éoliennes sont plus élevés

WTG = éolienne ;  $hi$  = haute ;  $lo$  = basse.

Aléa sismique (PGA) :

- Critique :  $PGA > 2,4$
  - Attention :  $2,4 \geq PGA > 0,8$
  - Ok :  $0,8 \geq PGA$
- PGA = Accélération pic du sol.

Densité de foudroiement :

- Critique :  $\text{Impacts de la foudre / an / km}^2 > 20$
- Attention :  $20 \geq \text{Impacts de la foudre / an / km}^2 > 10$
- Ok :  $10 \geq \text{Impacts de la foudre / an / km}^2$

Températures de fonctionnement :

Température normales :

- Critique : heures hors limites  $> 240$
- Attention : heures hors limites  $> 24$
- Ok : heures hors limites  $\leq 24$

Températures extrêmes :

- Critique : heures hors limites  $> 1$
- Attention :  $1 \geq$  heures hors limites  $> 0$ .
- Ok : 0 heures hors limites