

10. Electricité - eGRID

10.0. Introduction et guide	522
10.0.0 Introduction	522
10.0.1 A propos d'eGRID	522
10.0.2 Guide des étapes à suivre	523
10.1. Entrée des données	524
10.1.0 Les objets eGRID	524
10.1.1 Objet Réseau-externe (point de raccordement au réseau)	524
10.1.2 Objet Transformateur	525
10.1.3 La bibliothèque des transformateurs	528
10.1.4 Entrée des caractéristiques électriques des éoliennes	529
10.1.5 Objet Charge	533
10.1.6 Objet Jeu-de-barres	535
10.1.7 Objet Câblage-électrique	535
10.1.7.0 Entrée des informations relatives aux câbles	538
10.1.7.1 Outil de calcul de la section des câbles	542
10.1.8 Bibliothèque des câbles	542
10.1.9 Tableau eGRID	543
10.2. Calculs	544
10.2.0 Introduction aux calculs	544
10.2.1 Onglet Principal	544
10.2.2 Onglet Objets réseau	546
10.2.3 Onglet Pertes	547
10.2.4 Onglet Vérification du dimensionnement	548
10.2.5 Onglet Variation de tension	549
10.2.6 Onglet Courants de court-circuit	550
10.2.7 Onglet Flicker à long terme	551
10.2.8 Onglet Perturbations dues aux opérations de couplage	551
10.3. Rapports	553
10.4. ANNEXE. Theory behind the calculations	555
10.4.0 eGRID – Component Modeling	556
10.4.0.0 External Grid	556
10.4.0.1 Two-Winding-Transformers	556
10.4.0.2 Electrical Grid	557
10.4.0.3 Loads / Compensation Devices	557
10.4.0.4 Generators / Wind Turbine Generators	558
10.4.1 eGRID – Calculation Methods	559
10.4.1.0 Load-Flow Calculation / Calculation of Voltage Variations	560
10.4.1.1 Short-Circuit Calculation	561
10.4.1.2 Flicker calculation	562
10.4.1.3 Voltage Variations due to Switching Effects	564
10.4.1.4 Interaction of the flicker contributions of switching processes	564
10.5. Références:	567

10.0. Introduction et guide

10.0.0 Introduction

L'évaluation des perturbations produites par les éoliennes dans le réseau électrique et l'optimisation de l'infrastructure électrique des parcs, pour des raisons économiques, sont des éléments qui deviennent de plus en plus importants.

L'utilisation du module eGRID permet de dimensionner l'infrastructure électrique des parcs, de calculer les pertes électriques et de quantifier les principales perturbations introduites dans le réseau par les éoliennes dans le cas d'architectures non maillées.

Les résultats sont obtenus à partir de calculs de répartition de charges (load-flow) et de court-circuit. Ces résultats sont présentés ensuite sous formes de rapports. Il est possible de produire des rapports relatifs aux :

- pertes annuelles dans les câbles, les lignes électriques et les transformateurs en fonction des caractéristiques du vent,
- tensions en chaque nœud de l'infrastructure du parc et aux taux d'utilisation des éléments de l'infrastructure (vérification du dimensionnement),
- variations de tension en chaque nœud de l'infrastructure du parc,
- valeurs des courants de court-circuit en chaque nœud de l'infrastructure du parc,
- valeurs du flicker à long terme en chaque nœud de l'infrastructure du parc,
- valeurs du flicker et aux variations de tension dus aux opérations de couplage des éoliennes en chaque nœud de l'infrastructure du parc.

De plus la conformité des résultats peut être vérifiée par rapport aux normes/directives en vigueur (implémentées dans eGRID) ou par rapport à des valeurs définies par l'utilisateur. Toutes les personnes amenées à s'occuper du raccordement de parcs éoliens au réseau électrique – concepteurs, fabricants, exploitants – trouveront dans le module eGRID les outils nécessaires pour calculer les perturbations produites par les éoliennes d'une part, et les outils permettant d'optimiser l'infrastructure électrique du parc, d'un point de vue économique, d'autre part.

10.0.1 A propos d'eGRID

Le module eGRID a été développé dans le cadre du projet de recherche "DISPOWER" de l'UE (www.dispower.org) en collaboration avec l'université de Kassel (Institut für Elektrische Energietechnik/Elektrische Energieversorgungssysteme, Kassel) et l'ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel).

Pour utiliser le module eGRID, le module BASIS de WindPRO est nécessaire. C'est le module BASIS qui assure la gestion des objets et des cartes utilisés dans eGRID. Le module BASIS est décrit à la section 2.

eGRID détermine les perturbations produites par les éoliennes dans le réseau électrique à partir de calculs de répartition de charges (load-flow) et des courants de court-circuit (pour des architectures non maillées). Les calculs de répartition de charges sont basés sur des circuits électriques triphasés équilibrés. Les calculs des courants de court-circuit sont basés sur la norme allemande VDE 0102 et sur la norme internationale IEC 60909.

De plus, le module eGRID permet de calculer les pertes annuelles dans l'infrastructure électrique d'un parc à partir des caractéristiques du vent. Le calcul des pertes permet, à son tour, d'optimiser du point de vue économique, le dimensionnement de l'infrastructure électrique d'un parc.

Enfin, la description des éléments de l'infrastructure électrique d'un parc, tels que les transformateurs, les longueurs des câbles, est présentée sous une forme permettant d'établir facilement des listes de matériel.

Le calcul des longueurs des câbles se fait automatiquement à partir du tracé de leur cheminement sur la carte et des courbes de niveau si un objet *Données-lignes* avec les données altimétriques est présent dans le projet.

10.0.2 Guide des étapes à suivre

- Chargez les cartes topographiques et entrez les *Propriétés du projet* (voir chapitre BASIS).
- Le cas échéant, créez un objet *Données-lignes* (voir section 2, BASIS) pour un calcul automatique des longueurs des câbles/lignes prenant en compte les dénivelés du terrain.

Création des objets nécessaires

- Les objets *Eolienne*. Afin de réaliser des calculs plus précis, les fiches des éoliennes de la bibliothèque peuvent être complétées par leurs spécifications électriques (par ex. transformateur intégré, etc.). Pour des calculs simples les puissances nominales qui sont toujours renseignées suffisent. On peut, éventuellement, entrer manuellement la valeur de leur *CosPhi* si nécessaire.
- L'objet *Réseau-externe*. Cet objet permet de définir les niveaux de tension qui sont utilisés dans le projet et d'indiquer la puissance de court-circuit du réseau électrique au point de raccordement du parc.
- L'objet *Câblage-électrique*. Dans cet objet sont contenues toutes les informations relatives aux câbles/lignes de l'infrastructure du parc éolien. Cet objet est une variante de l'objet *Données-lignes* de WindPRO, il doit, par conséquent, être en mode édition pour pouvoir ajouter ou modifier des câbles/lignes. Les câbles/lignes sont numérisés et affichés sur la carte; l'activation de la fonction « snap » fait que les extrémités des câbles/lignes viennent se coller aux autres objets facilitant ainsi leur tracé ; quand un objet est déplacé le câble suit. Lors du tracé du cheminement d'un câble, un clic sur le bouton droit de la souris permet de créer un objet connecté à l'extrémité du câble, un transformateur par exemple. A partir des données de tension et de puissance des éoliennes, eGRID peut faire automatiquement le dimensionnement du câblage en utilisant des câbles « génériques ». Ce mode de calcul est très pratique dans les phases préparatoires de la conception de l'infrastructure du parc.
- Les objets *Transformateur*, *Jeu-de-barres* (pour raccorder plusieurs câbles/lignes en un même point) et *Charge*. Ces objets peuvent être placés librement et doivent être interconnectés par des câbles/lignes pour être pris en compte dans les calculs.

Calculs

- Démarrez le calcul eGRID à partir de la fenêtre *Calculs et rapports* puis sélectionnez les calculs que eGRID doit effectuer.
- Pour le calcul des *Pertes*, il est nécessaire de donner le productible annuel du parc ou les caractéristiques du vent qui permettent d'estimer cette production.
- Affichez/imprimez le rapport.

10.1. Entrée des données

10.1.0 Les objets eGRID

Si nécessaire, reportez-vous à section 2, BASIS, pour les informations relatives à l'utilisation des cartes et à la manipulation des objets.



Les objets eGRID se trouvent rassemblés sous une icône unique dans la barre d'objets. Cette icône représente l'objet *Réseau-externe* qui est toujours le premier utilisé quand on commence concevoir un réseau avec eGRID. En plaçant le pointeur de la souris au-dessus de l'icône de l'objet *Réseau-externe* apparaissent les autres objets eGRID qui sont en partant du haut: l'objet *Câblage-électrique* (qui permet de tracer le cheminement des câbles/lignes), l'objet *Jeu-de-barres* (pour raccorder plusieurs câbles/lignes en un même point), l'objet *Transformateur* et finalement l'objet *Charge*.

10.1.1 Objet Réseau-externe (point de raccordement au réseau)



La position sur la carte de l'objet *Réseau-externe* indique le lieu de raccordement au réseau électrique. Après avoir posé l'objet à l'endroit voulu sur la carte, la fenêtre *Propriétés de l'objet Réseau-externe*, voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, s'ouvre automatiquement où un certain nombre d'informations réliminaires doivent être entrées.

Propriétés de l'objet Réseau-externe (Réseau-externe (1))

Position | Calques | Données | Description

Puissance de court-circuit infinie
 Puissance de court-circuit Sk [MVA] 10,00
 Puissance de CC subtransitoire Sk* [MVA] 11,00
 Courant de court-circuit Ik [kA] 0,19
 Courant de CC subtransitoire Ik* [kA] 0,21

Psi [deg.] 70,00
 Rapport R/X 0,36
 Rapport X/R 2,75

Autres données

Valeurs relatives aux éoliennes à utiliser pour calculer les sections des câble :

CosPhi pour les éoliennes sans données eGRID

1,00

Point de fonct. des éoliennes

P nominale
 Pmax. courbe de puissance
 Pmax 10 mn
 Pmax 1 mn
 Pmax instantanée

Coeff. pour le calcul du point de fonct. des éol. sans données eGRID

1,00

Niveaux de tension et tolérances utilisés dans le réseau:

Nom du niveau	Tens. nominale (kV)	+ %	- %	Style de ligne
MT	30	5	5	—
BT	0,69	10	15	—

Charger Enregistrer Modifier Ajouter Supprimer

Ok Annuler Précédent Suivant

Figure 1

L'objet *Réseau-externe* est un objet fondamental. Il sert à entrer la *Puissance de court-circuit*, l'angle d'impédance *Psi*, la tension et la *Fréquence* du réseau électrique au point de raccordement, mais aussi :

- tous les *Niveaux de tensions et les tolérances utilisés dans le réseau*,
- le *CosPhi pour les éoliennes sans données eGRID* et le *Point de fonctionnement des éoliennes* à partir duquel l'outil de calcul automatique de la section des câbles déterminera les sections minimales pour chaque segment de l'infrastructure.

Concernant les caractéristiques du réseau électrique au point de raccordement, les informations peuvent être entrées sous différents format :

- sa puissance de court-circuit peut être donnée par sa *Puissance de court-circuit S_k* , ou sa *Puissance de court-circuit subtransitoire S_k''* , ou par son *Courant de court-circuit I_k* , ou par son *Courant de court-circuit subtransitoire I_k''* .
- son angle d'impédance peut être donné par sa valeur *Psi (Ψ_k)*, ou par le *Rapport R/X*, ou par le *Rapport X/R*.

L'entrée des différents niveaux de tension utilisés se fait dans la fenêtre *Définir une tension*, voir Figure 2.

- Le *Nom du niveau* est utilisé dans les menus invitant à faire un choix de tension.
- Les *Limites max. et min.* doivent être entrées pour chaque niveau de tension. A l'issue des calculs, le respect des limites est contrôlé pour chacun des nœuds de l'infrastructure du parc. Par défaut ce sont les limites définies dans cette fenêtre qui sont utilisées mais elles peuvent être modifiées ultérieurement lors du lancement des calculs.
- Sur la carte, chaque câble prendra la *Couleur et l'Épaisseur de la ligne* associée au niveau de tension auquel il est soumis.

Figure 2

10.1.2 Objet Transformateur



Lors de la création d'un objet *Transformateur* la fenêtre *Propriétés de l'objet Transformateur* s'ouvre directement sur l'onglet *Données*, voir Figure 3.

Choisir transformateur propose un menu déroulant avec plusieurs options dont le choix du transformateur dans la *Bibliothèque* de WindPRO.

Dans le cadre *Valeurs du réseau* il faut indiquer les tensions aux bornes du transformateur à l'aide des menus déroulants *Tension haute* et *Tension basse* qui listent les tensions définies préalablement dans l'objet *Réseau-externe*. On peut choisir des tensions identiques dans le cas où une isolation galvanique est exigée entre l'infrastructure du parc et le réseau électrique.

Les caractéristiques électriques du transformateur sont décrites dans les quatre sous-onglets suivants :

- *Principales caractéristiques*, voir Figure 3. La donnée la plus importante est la valeur de la puissance nominale (S_r) en MVA. Par exemple pour un parc éolien de 10MW ayant un *CosPhi* de 0,9 la valeur minimale $S_r = 10/0,9 = 11,1$ MVA. Les *Tensions nominales haute et basse* doivent correspondre avec celles indiquées dans le cadre *Valeurs du réseau*, mais il est possible d'utiliser les transformateurs avec

des tensions légèrement différentes de leur tension nominale. Dans le cas de la création d'un nouveau transformateur (c.à.d. non choisi dans la *Bibliothèque*), WindPRO génère le nom du fichier du transformateur à partir de ses *Principales caractéristiques*.

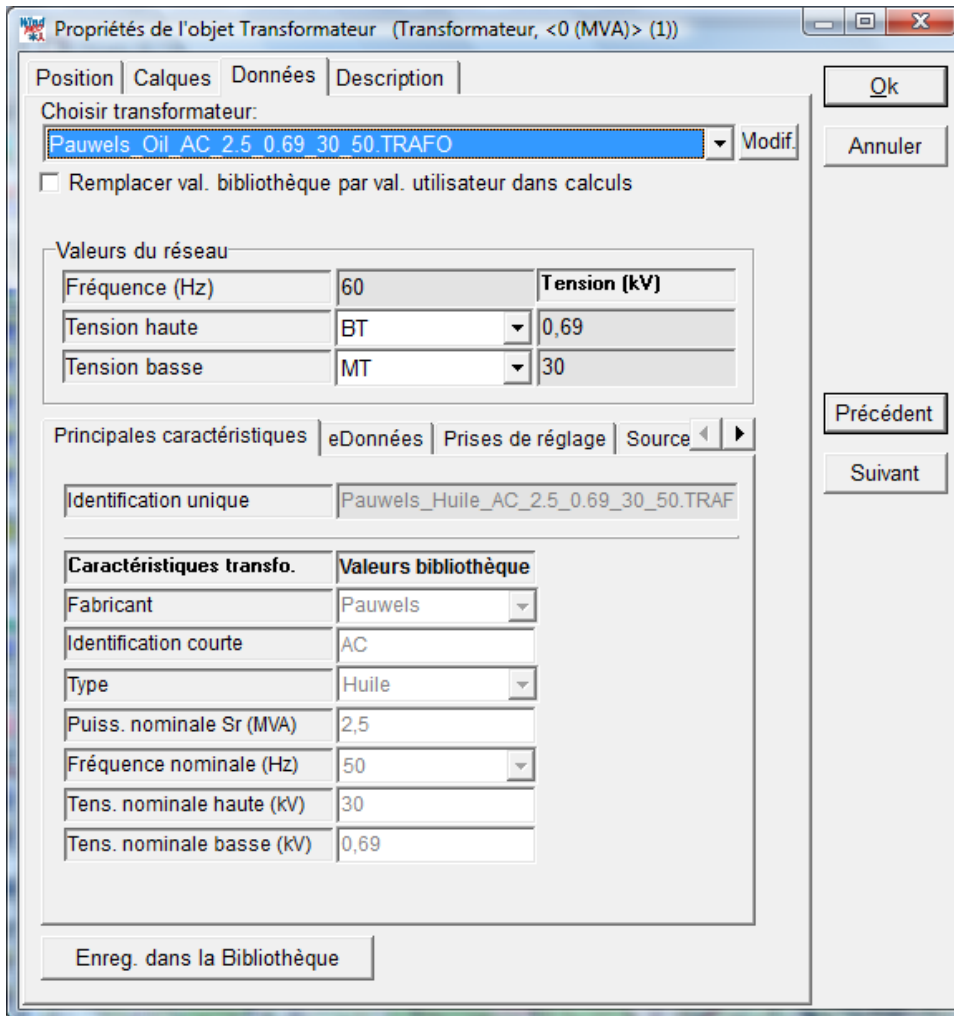


Figure 3

- *eDonnées*, voir Figure 4, présente les caractéristiques électriques spécifiques au transformateur telles que la tension de court-circuit, les pertes cuivre, etc.
Note : dans le cas de la création d'un nouveau transformateur (c.à.d. non choisi dans la *Bibliothèque*), WindPRO propose automatiquement, à partir des données entrées dans le sous-onglet *Principales caractéristiques*, des *Valeurs génériques* que vous pouvez modifier dans *Valeurs utilisateur*.

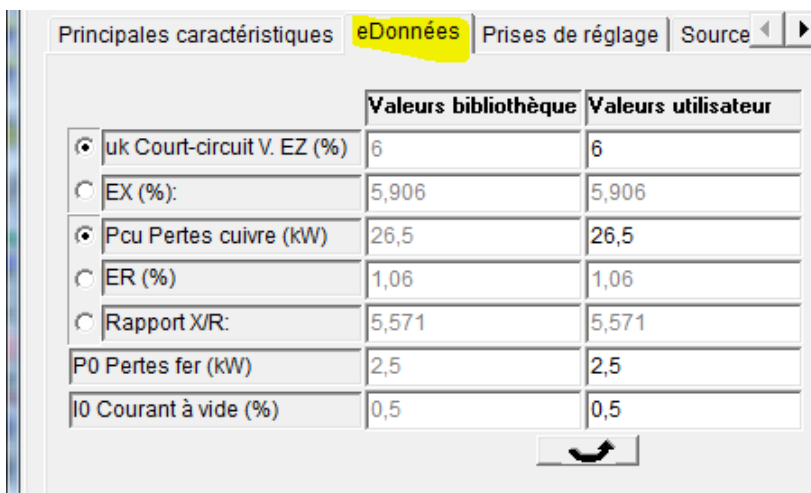


Figure 4

- *Prises de réglage*, voir Figure 5 :

Les *Prises de réglages* permettent d'ajuster le rapport de transformation et sont utilisées pour compenser les écarts de tension dans les réseaux électriques. Ainsi dans le réseau de distribution les transformateurs situés près de la station de transformation de niveau supérieur réduiront la tension pour la ramener au niveau nominal, tandis que les plus éloignés devront généralement augmenter la tension pour compenser les pertes en ligne et la ramener au niveau nominal.

Au niveau des stations de transformation haute tension, les transformateurs utilisés disposent d'un ajustement automatique de tension en fonction de la charge. Dans cette version d'eGRID, l'ajustement doit être fait manuellement par l'utilisateur. Il est prévu que, dans une future version, eGRID puisse calculer et faire les ajustements des prises de réglages automatiquement.

Le *Type de couplage* décrit la configuration physique du transformateur, c'est à dire comment sont interconnectés les enroulements (étoile ou triangle) et donne aussi la valeur de la rotation de phase entre le primaire et le secondaire. Les fabricants proposent diverses configurations standards, mais ils fabriquent souvent les transformateurs suivant les spécifications fournies par les clients.

Prises de réglage	Valeurs bibliothèque	Valeurs utilisateur
Auto:	FAUX	FAUX
Incrément par prise (%)	2,5	2,5
Tension min %	-2,5	-2,5
Tension max %	2,5	2,5
Prise en service %	0	0

Type de couplage		
Côté HT	D	D
Côté BT	yn	yn
Rotation de phase * 30 deg	5	5

Figure 5

- *Source/description*, voir Figure 6. Ce sous-onglet présente la provenance des données et présente, éventuellement, une brève description du transformateur.

Source/description	Valeurs bibliothèque
Source	Pauwels
Date	01/04/2004
Description	Generated using a 20/0.4kV type; Estimated values

Figure 6

Le bouton *Enregistrer dans la Bibliothèque*, voir Figure 3, permet d'enregistrer dans la *Bibliothèque* un nouveau transformateur créé par l'utilisateur.

10.1.3 La bibliothèque des transformateurs

La fenêtre de consultation de la *Bibliothèque des transformateurs*, telle qu'elle apparaît dans sa configuration par défaut, est présentée à la Figure 7.

A chaque transformateur de la bibliothèque correspond un fichier.

Le cadre situé dans la partie gauche de la fenêtre montre l'arborescence de la bibliothèque. Un clic droit dans ce cadre ouvre un menu contextuel permettant d'étendre la recherche à d'autres répertoires.

Si l'option *Filtrer le dossier sélectionné* est cochée, seuls les transformateurs du dossier sélectionné seront affichés.

Un clic sur l'onglet latéral *Aperçu* ouvre la fenêtre du même nom montrant les caractéristiques détaillées du transformateur sélectionné.

Pour utiliser un transformateur de la bibliothèque, il suffit de faire un double-clic sur le modèle voulu.

Un clic-droit sur le transformateur surligné ouvre un menu contextuel qui permet de *Modifier*, de coller dans le *Presse-papiers*, etc. les spécifications du transformateur.

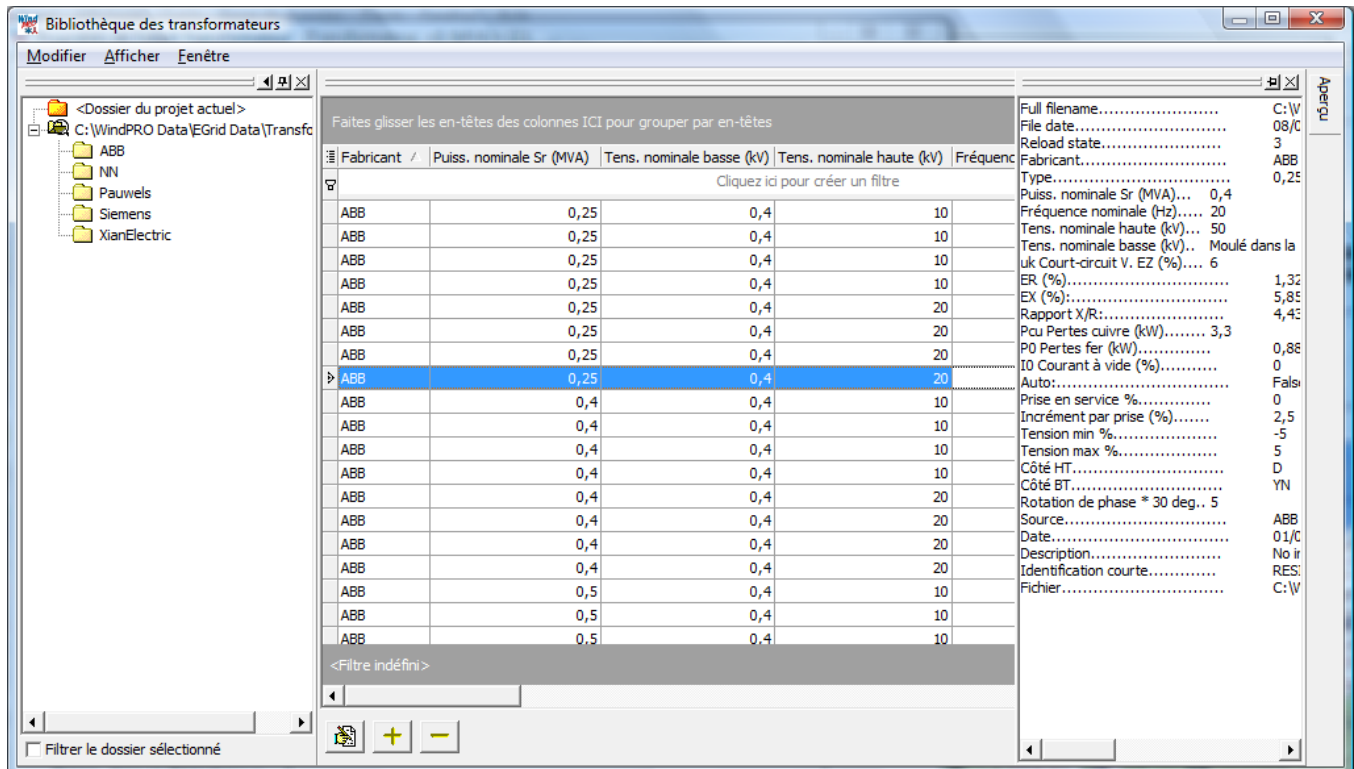


Figure 7

Actuellement, le catalogue contient plus de 1000 références. Afin de faciliter la recherche, on peut réorganiser la l'arborescence en faisant glisser les en-têtes des colonnes dans *Faites glisser les en-têtes des colonnes ICI...* voir la Figure 8.

Il est également possible de créer des filtres à partir des caractéristiques recherchées en cliquant sur le bouton *Créer filtre*, voir Figure 8.

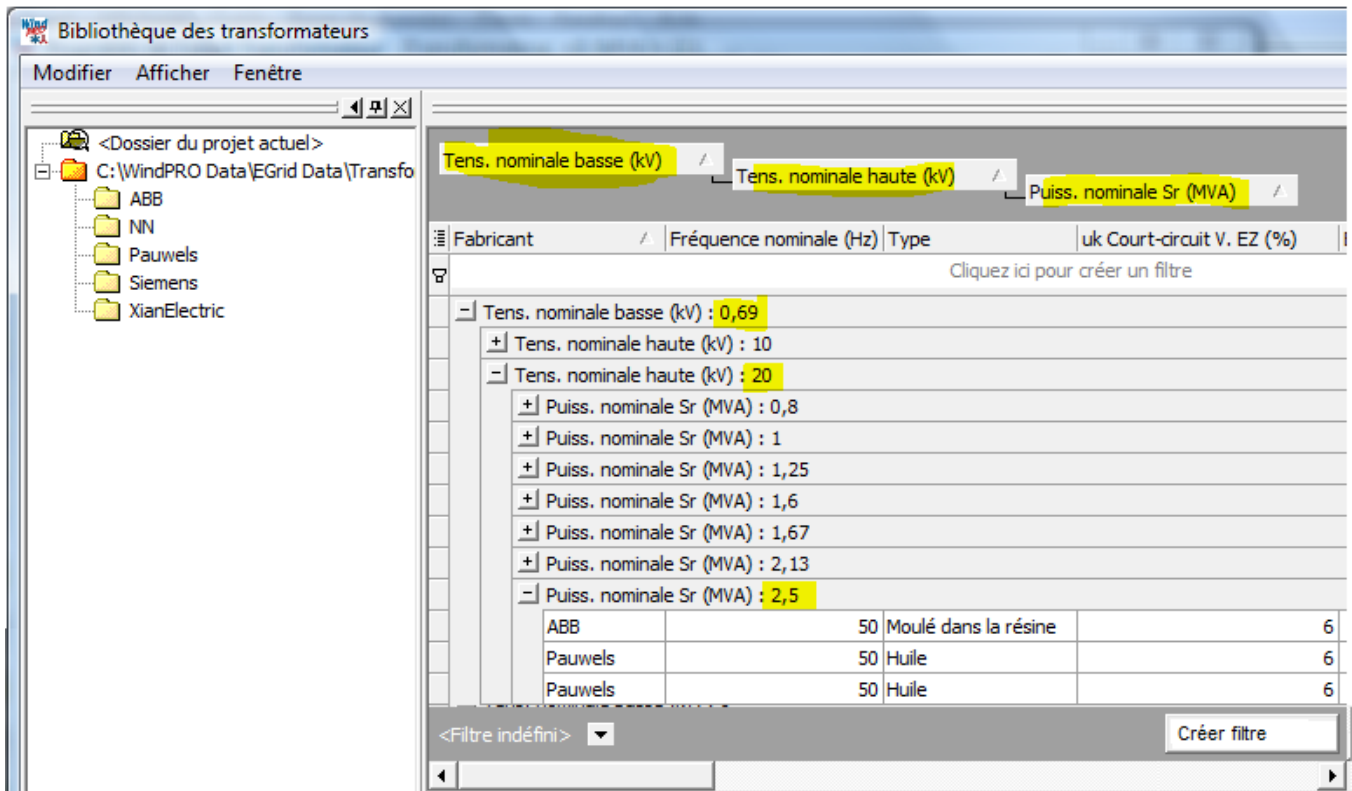


Figure 8

10.1.4 Entrée des caractéristiques électriques des éoliennes



La mise en œuvre des objets *Eolienne* est traitée dans la section 2 BASIS. Cette section présente uniquement leur utilisation avec eGRID.

Notez qu'eGRID ne fait aucune différence entre les objets *Nouvelle-éolienne* et *Eolienne-existante*.

Pour des études préparatoires ou pour des configurations simples, par exemple quand un seul type d'éolienne est utilisé, ou bien si l'on considère que toutes les éoliennes ont le même CosPhi, la saisie des données décrites dans la suite de ce chapitre n'est pas nécessaire. Les informations requises sont alors entrées directement dans la fenêtre de *Définir calcul* qui est décrite ultérieurement au 10.2.

Dans la bibliothèque, les fiches des éoliennes ont été enrichies par l'adjonction d'une partie appelée *eGRID Data*. On trouve les informations nécessaires pour compléter cette partie dans les rapports de test électriques des éoliennes.

Dans la pratique, on trouve des tests basés sur les protocoles des normes IEC-61400-21, MEASNET et FGW (Fördergesellschaft Windenergie e.V. allemand).

Depuis sa révision, le protocole de la norme FGW est identique celui de la norme IEC ; le protocole de la norme MEASNET intègre en plus des tests sur les harmoniques ; étant donné qu'eGRID ne calcule pas les harmoniques les trois protocoles sont identiques du point de vue d'eGRID. Par conséquent deux grilles de saisie des *Données eGRID* sont proposées : celle correspondant au protocole de l'ancienne norme FGW et celle correspondant au protocole des normes MEASNET, IEC et nouvelle FGW.

Pour accéder au *Données eGRID*, ouvrez la fiche de l'éolienne et allez à l'onglet *Données détaillées*, si aucune *Données eGRID* n'est disponible cliquez sur le bouton *Nouveau* et choisissez *eGRID Data* dans le menu contextuel pour ouvrir la fenêtre *Données eGRID* présentée à la Figure 9.

Les *Données eGRID* sont organisées en 5 onglets :

Onglet **Principal**, voir Figure 9 :

Cet onglet contient les données relatives au *Type de générateur*, aux *Coefficients de puissance pic* de l'éolienne, au *CosPhi* (avec les éoliennes modernes, il n'y a pas de différence entre le facteur de puissance réel λ , qui tient compte des harmoniques, et le facteur de puissance CosPhi) et au *Courant de court-circuit* (si l'option *Utiliser les paramètres par défaut d'impédance* est cochée alors une valeur standard fonction du type de générateur est automatiquement donnée).

Le menu déroulant *Protocole de mesure* permet de choisir la grille de saisie des données se rapportant à l'*Ancienne FGW* ou celle se rapportant aux protocoles *MEASNET, IEC 61400-21, nouvelle FGW*. Le choix affecte le contenu des onglets *Flicker* et *Couplages*.

Figure 9

Onglet **CosPhi**, voir Figure 10 :

Cet onglet permet d'entrer la valeur du CosPhi en fonction du point fonctionnement de l'éolienne y compris quand l'éolienne fonctionne comme une charge (consommation propre de l'éolienne présente même quand elle ne produit pas).

Pour entrer les données, il faut décocher l'option *CosPhi non disponible, utiliser CosPhi onglet Principal*.

Ensuite, il faut indiquer si les points de fonctionnement de l'éolienne seront indiqués en *Puissances absolues* ou en *Puissances relatives*.

Enfin, il faut indiquer comment sera exprimé le *CosPhi*, soit directement, soit indirectement par les combinaisons deux à deux des *Puissance active P*, *Puissance réactive Q* et *Puissance apparente S*.

La première ligne du tableau *Load* permet de donner la valeur du CosPhi quand l'éolienne fonctionne comme une charge. Les lignes suivantes *Operation* permettent de donner la valeur du CosPhi pour différents points de fonctionnement de l'éolienne. Si des valeurs intermédiaires sont nécessaires eGRID les calcule en faisant des interpolations linéaires.

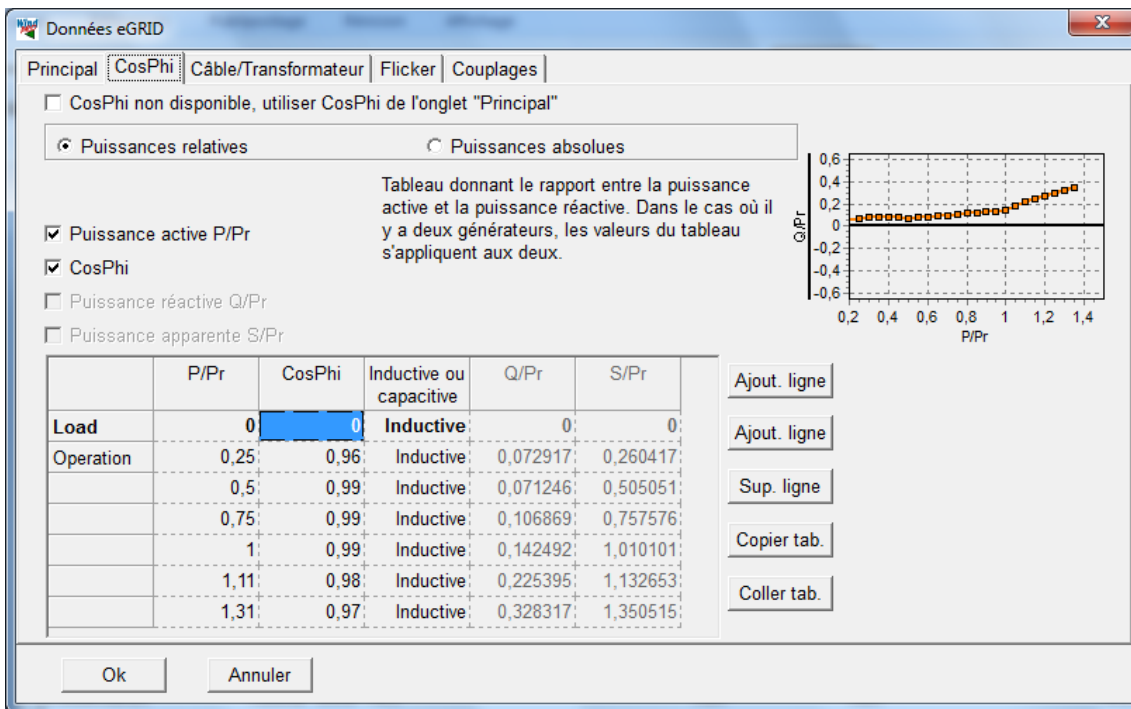


Figure 10

Onglet *Câbles/Transformateur*, voir Figure 11

Cet onglet permet de décrire les composants internes de l'éolienne en utilisant les bibliothèques des câbles et des transformateurs. Ces informations sont optionnelles, elles permettent le calcul des tensions et des pertes dans l'éolienne.

En général les courbes de puissance d'une éolienne donnent la puissance au niveau du générateur ; si l'éolienne a un transformateur intégré, les courbes de puissance sont normalement mesurées à la sortie du transformateur mais ce n'est pas toujours vrai et dans ce cas l'utilisation de l'onglet *Câbles/Transformateur* permet de prendre en considération les pertes dans le transformateur.

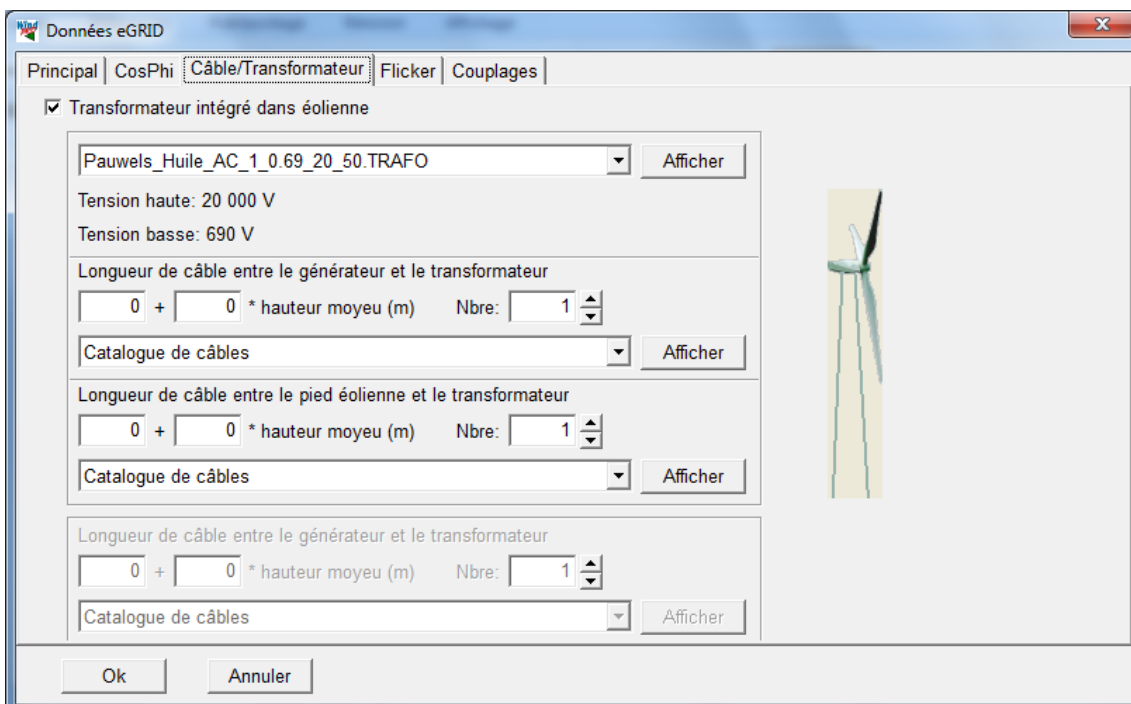
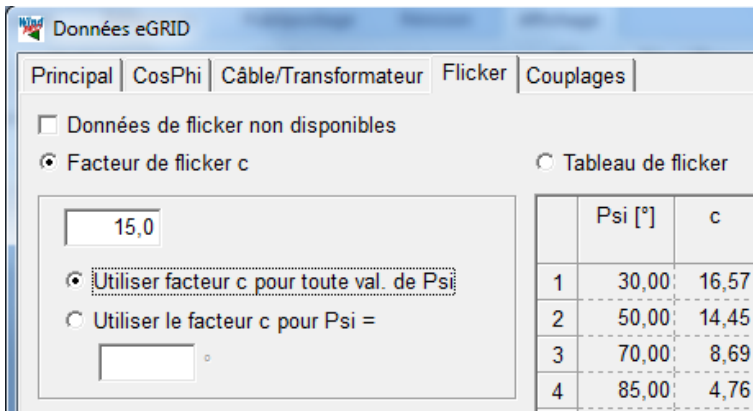


Figure 11

Onglet *Flicker*, voir Figure 12 et Figure 13

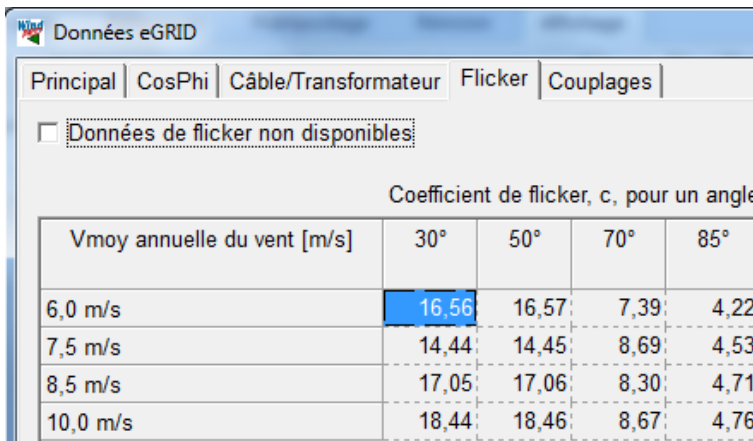
L'onglet *Flicker* permet d'entrer les valeurs de *C*, caractéristiques de l'éolienne, à partir desquelles sera calculé le flicker produit par l'éolienne. La description de *C* diffère selon le *Protocole de mesure* choisi dans l'onglet *Principal*.



Protocole de l'*Ancienne FGW*: selon les informations disponibles on peut entrer :

- une valeur de *C*,
- une valeur de *C* et un angle d'impédance du réseau,
- tableau des valeurs *C* en fonction de l'angle d'impédance du réseau.

Figure 12

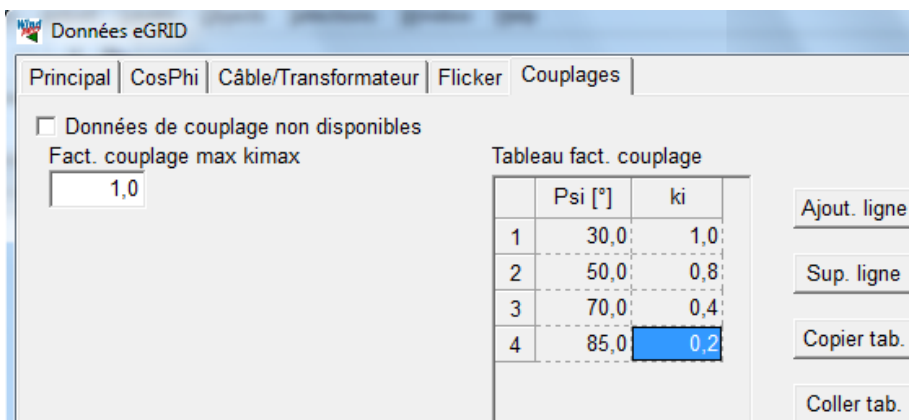


Dans le cas du protocole *MEASNET, IEC 61400-21, nouvelle FGW*, les valeurs de *C* doivent être données pour les angles d'impédance du réseau et les vitesses de vent montrées dans la Figure 13.

Figure 13

Onglet *Couplages*, voir Figure 14 et Figure 15.

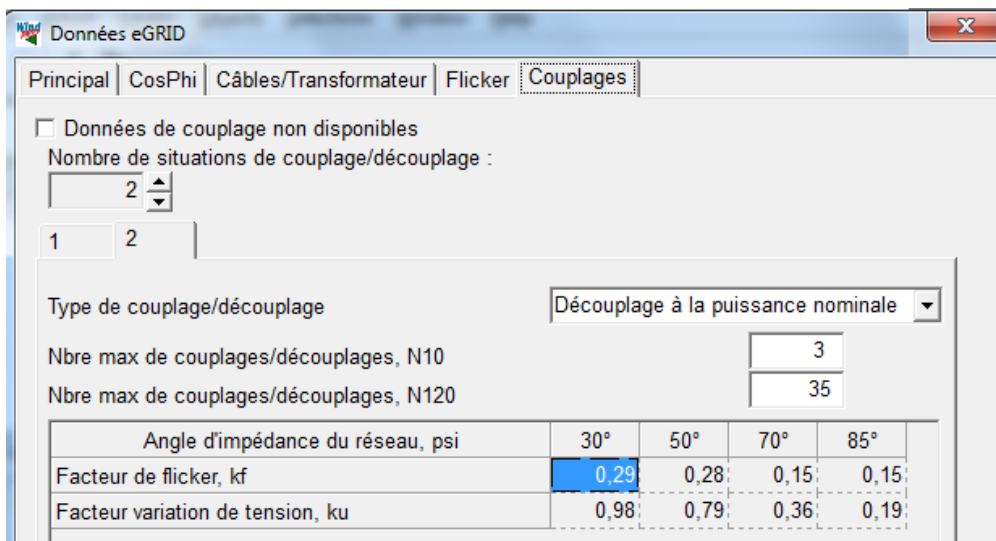
L'onglet *Couplages* permet d'entrer les valeurs des facteurs *ki* ou *ku* et *kf* caractéristiques de l'éolienne qui seront utilisés pour le calcul des variations de tension et du flicker résultant des opérations de couplage/découplage. La description de ces facteurs diffère selon le *Protocole de mesure* choisi dans l'onglet *Principal*.



Si le protocole de l'*Ancienne FGW* est choisi l'onglet *Couplages* permet d'entrer les valeurs de *ki* à partir desquelles seront calculées les variations de tension dues aux opérations de couplage/découplage.

Figure 14

Si le protocole correspondant aux normes *MEASNET*, *IEC 61400-21*, *nouvelle FGW* est choisi, les valeurs de *ku* et *kf* doivent être entrées en fonction de l'Angle d'impédance du réseau et du Type de couplage/découplage.



Données eGRID

Principal | CosPhi | Câbles/Transformateur | Flicker | **Couplages**

Données de couplage non disponibles

Nombre de situations de couplage/découplage :

1 2

Type de couplage/découplage :

Nbre max de couplages/découplages, N10 :

Nbre max de couplages/découplages, N120 :

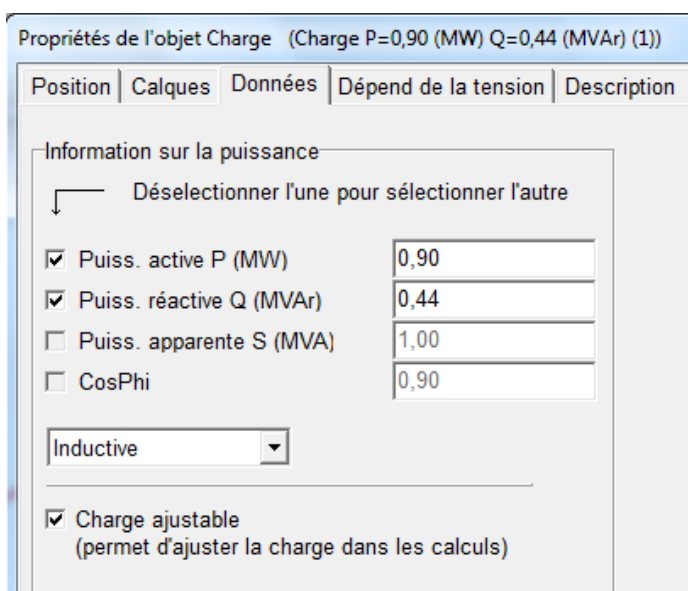
Angle d'impédance du réseau, psi	30°	50°	70°	85°
Facteur de flicker, kf	0,29	0,28	0,15	0,15
Facteur variation de tension, ku	0,98	0,79	0,36	0,19

Figure 15

10.1.5 Objet Charge



Les données électriques de l'objet *Charge* sont entrées dans les deux onglets de la fenêtre *Propriétés de l'objet Charge* présentés à la suite.



Propriétés de l'objet Charge (Charge P=0,90 (MW) Q=0,44 (MVA) (1))

Position | Calques | **Données** | Dépend de la tension | Description

Information sur la puissance

↳ Désélectionner l'une pour sélectionner l'autre

Puiss. active P (MW) :

Puiss. réactive Q (MVA) :

Puiss. apparente S (MVA) :

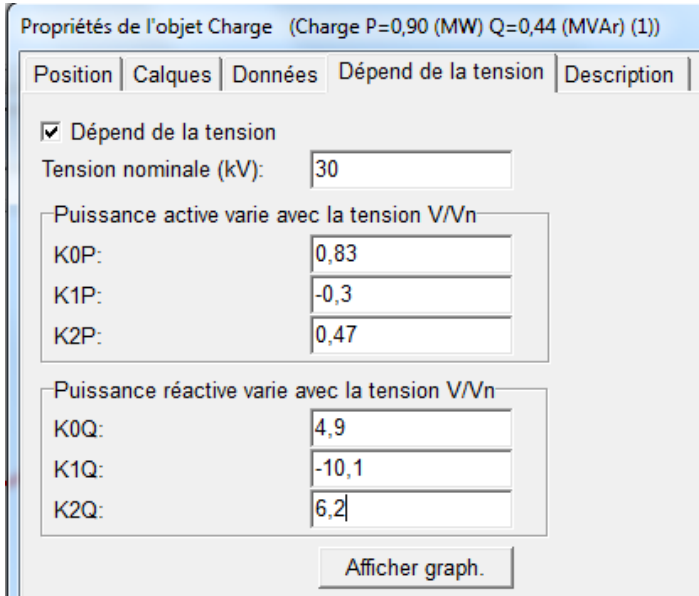
CosPhi :

Charge ajustable (permet d'ajuster la charge dans les calculs)

Onglet *Données*, voir Figure 16.

Il permet de décrire les caractéristiques nominales de la charge à partir d'informations sur la puissance absorbée. De plus, en cochant l'option *Charge ajustable* sa valeur pourra être ajustée dans les calculs. L'ajustement est défini en % des puissances active et réactive nominales.

Figure 16



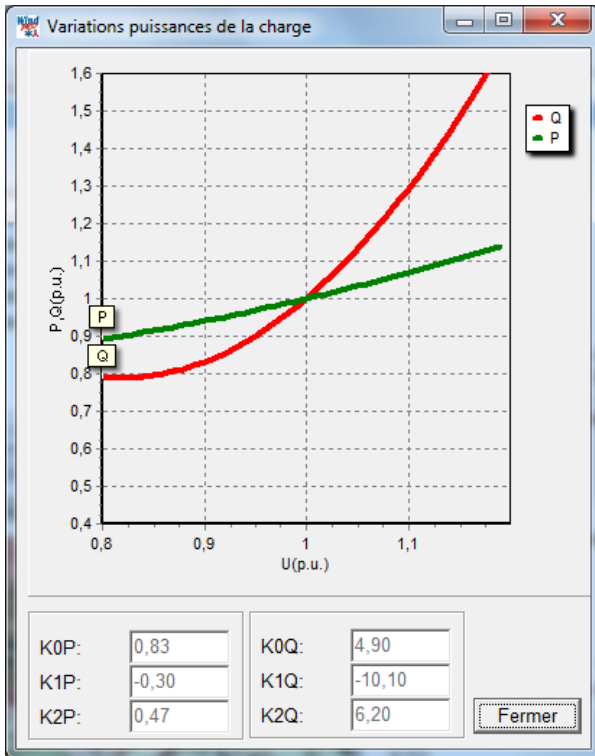
Onglet *Dépend de la tension*, voir Figure 17. Par défaut les caractéristiques de la charge créée sont indépendantes de la tension à ses bornes.

Pour définir une charge dépendante de la tension, il faut cocher l'option *Dépend de la tension*, entrer la *Tension nominale* aux bornes de la charge et les six coefficients des deux équations, présentées à la suite, qui régissent la variation des puissances active et réactive en fonction de la variation de la tension.

Figure 17

$$P = P_n \cdot \left(K_{0P} + K_{1P} \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + K_{2P} \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \right)$$

$$Q = Q_n \cdot \left(K_{0Q} + K_{1Q} \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + K_{2Q} \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \right)$$




Un clic sur le bouton *Afficher graphique* ouvre la fenêtre *Variation de puissance de la charge* de Figure 18 qui présente les courbes de variation des puissances actives et réactives en fonction de la variation de la tension aux bornes de la charge.

Dans cette fenêtre, un double clic sur le graphique ouvre des menus permettant de configurer la présentation.

Il est aussi possible de zoomer sur une zone du graphique que l'on délimite en faisant glisser le pointeur de la souris tout en maintenant le bouton gauche enfoncé.


Figure 18

10.1.6 Objet Jeu-de-barres

 La fenêtre *Propriétés de l'objet Jeu-de-barres* ne comporte que les onglets *Position*, *Calques* et *Description*. En effet, aucune donnée de type électrique n'est nécessaire pour définir cet objet qui sert simplement à matérialiser le point de raccordement de plusieurs câbles.


Note : quand deux câbles de type différent sont raccordés entre eux eGRID crée automatiquement un *Jeu-de-barres*.


10.1.7 Objet Câblage-électrique

 Cet objet le plus complexe, il est l'élément central d'eGRID. Sa mise en œuvre est assez similaire à celle l'objet *Données-lignes* (utilisé pour décrire les courbes de niveaux). De la même manière sa position sur la carte est indifférente et il doit être en *Mode édition* pour qu'il soit possible d'entrer ou de modifier des informations.

Notes :

- quand l'objet est en *Mode édition* les autres objets ne peuvent pas être modifiés.
- si lors de la création d'un nouveau câble on a introduit au cours du tracé des objets (*Eoliennes*, *Charges*, etc.), lorsqu'on fait un clic gauche sur le câble seul le segment de câble compris entre deux objets est sélectionné (il apparait alors en pointillés). Pour sélectionner l'ensemble du câble, il faut ensuite faire un clic droit sur le segment de câble en pointillés et choisir *Etendre la sélection à tout le câble* dans le menu contextuel qui s'ouvre.

 Pour passer en *Mode édition*, il faut sélectionner l'objet *Câblage-électrique* en cliquant dessus avec le bouton gauche de la souris, faire un clic droit pour ouvrir le menu contextuel et choisir *Mode édition* dans ce menu. Une autre manière de passer en *Mode édition* est de presser les touches <Ctrl+E> après avoir sélectionné l'objet.

 Quand l'objet *Câblage-électrique* est sélectionné, un petit carré noir s'affiche en son centre et quand il est en *Mode édition* il est entouré d'un carré en pointillés rouges. La combinaison de touches <Ctrl+E> permet de quitter directement le *Mode édition* sans avoir à repasser par le menu contextuel.

Dans eGRID les câbles ou lignes aériennes présentent la même interface utilisateur.

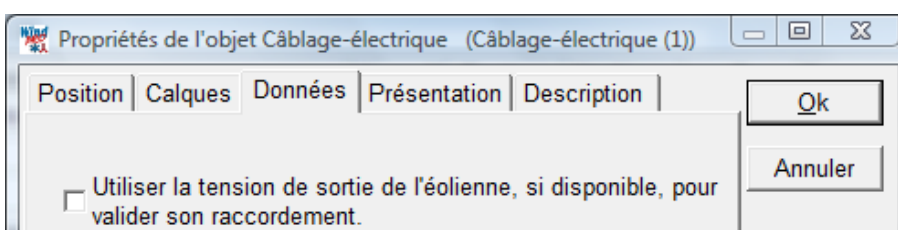
Le calcul des longueurs est fait automatiquement. L'utilisateur peut paramétrer le calcul des longueurs supplémentaires pour prendre en compte flèche des lignes, l'incertitude sur le cheminement des câbles et les longueurs additionnelles nécessaires aux branchements.

Dans le cas des câbles, on peut entrer la description des conditions environnantes telles que le *Type de pose*, la *Résistivité thermique du sol*, etc. qui à leur tour vont déterminer un *Facteur de limitation* qui vient réduire la capacité de transport d'énergie du câble par rapport à ses caractéristiques nominales.

Dans le cas des lignes aériennes on n'introduit pas les conditions environnantes et dans ce cas le *Facteur de limitation* est introduit arbitrairement par l'utilisateur.

Dans suite de cette section, afin de simplifier sa lecture, le terme câble sera utilisé également pour les lignes aériennes.

Lors de la création d'un objet *Câblage-électrique*, la fenêtre *Propriétés de l'objet Câblage-électrique*, voir Figure 19, s'ouvre automatiquement, qui propose de vérifier que l'éolienne que l'on veut raccorder est compatible avec le niveau de tension auquel on veut la raccorder. Si cette option est cochée, le raccordement sera refusé si les niveaux de tensions sont incompatibles ; en l'absence des caractéristiques électriques de l'éolienne, permettant la vérification, le raccordement est toujours accepté.



Note : il est préférable de décocher cette option si votre PC n'est pas performant ou si le nombre de machines du parc étudié est très important.

Figure 19

Étapes à suivre pour la création d'un câble :

Lors de sa création l'objet *Câblage-électrique* est automatiquement en *Mode édition*. Pour commencer le câblage placez le pointeur sur un des objets à raccorder, faites un clic droit pour appeler le menu contextuel, voir Figure 20, choisissez *Créer un nouveau câble* qui à son tour ouvre la fenêtre *Propriétés du câble ou de la ligne* (décrite dans la suite), entrez les informations adéquates, refermez la fenêtre et commencez à tracer le cheminement par des clics gauche sur la carte.

Si l'option *Afficher le symbole de l'effet d'aimant*... a été cochée, la connexion du câble à un objet est confirmée par un demi cercle entourant l'objet.

Le « snap » raccorde automatiquement l'extrémité du câble à l'objet se trouvant à proximité, *Pour activer la fonction "snap" (effet d'aimant) maintenir la touche <Ctrl> enfoncée*, comme indiqué dans le menu.

L'option *Interdire la création de boucles* interdit les raccordements formant une boucle car eGRID ne permet pas de travailler sur les réseaux maillés.

Une fois le câble raccordé à un objet, il peut être prolongé et raccordé à d'autres objets sans qu'il soit nécessaire de recréer à chaque fois un nouveau câble.

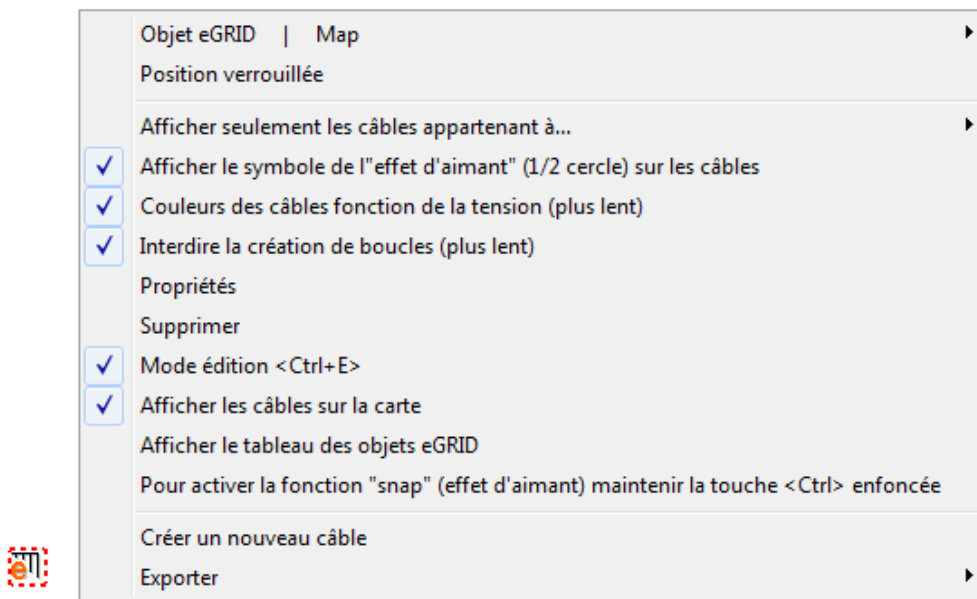


Figure 20

Pour terminer la création d'un câble, il faut appeler le menu contextuel par un clic droit et de choisir l'option *Fin*, voir Figure 21. Ce même menu permet, en utilisant l'option *Insérer objet* de créer à l'extrémité du câble un transformateur ou une éolienne et de poursuivre le tracé du câble.

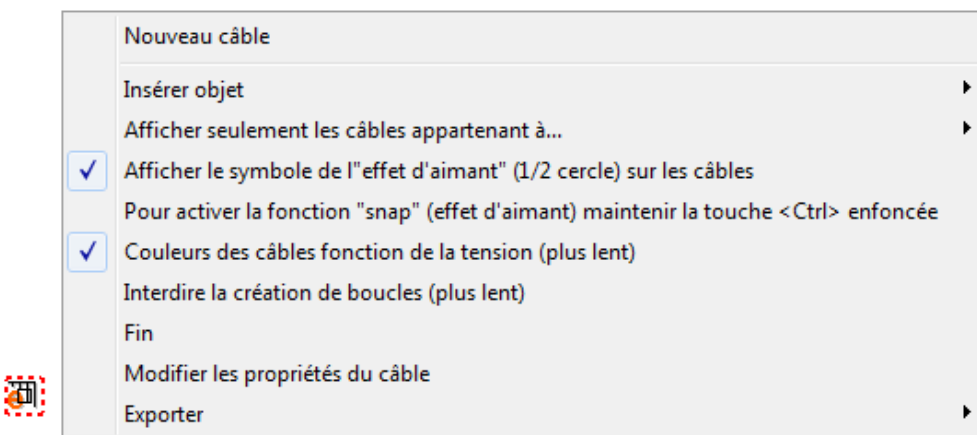


Figure 21

Etapes à suivre pour la modification d'un câble :

Pour modifier un câble, il suffit de le sélectionner sur la carte par un clic gauche et d'appeler le menu contextuel. Un clic droit sur un segment du câble ouvre le menu de la Figure 22 ; un clic droit sur un point du câble ferait apparaître l'option *Supprimer point* à la place d'*Entrer point*.

Un clic sur *Modifier les caractéristiques du câble* ouvre la fenêtre *Propriétés du câble ou de la ligne* (décrite dans la suite) qui peut être également ouverte par un double clic sur le câble.

Les points composant un câble peuvent être déplacés simplement en les faisant glisser avec le pointeur de la souris.

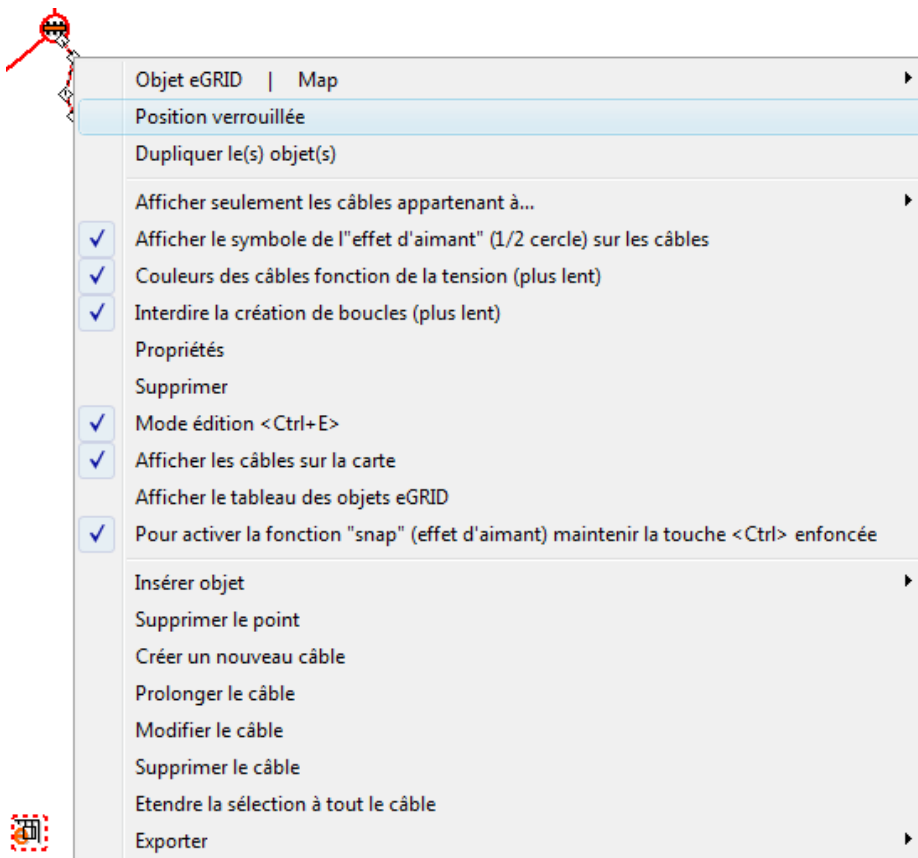


Figure 22



Représentation des différents états d'un câble, voir Figure 23.

Figure 23

10.1.7.0 Entrée des informations relatives aux câbles

La fenêtre *Propriétés du câble ou de la ligne*, voir Figure 24, permet d'entrer les données relatives aux câbles et aux lignes.

La partie gauche de la fenêtre sert à entrer les informations relatives à la pose du câble (raccordement, longueur, nombre de systèmes de câbles en parallèle, etc.).

La partie droite sert à entrer les caractéristiques du câble, soit en le choisissant dans la *Bibliothèque des câbles*, soit en décrivant ses caractéristiques (matériau de l'*Isolant*, matériau du *Conducteur*, *Section*, etc.).

Cette fenêtre présente les *Sections nécessaires* minimales recommandées produites par l'outil de calcul des sections des câbles. Une information détaillée sur cet outil est donné dans la suite.

Figure 24

Informations relatives à la pose du câble

Les menus *De* et *à* indiquent les objets auxquels est raccordé le câble, ils permettent aussi de les changer.

Onglet *Principal* (voir Figure 24)

- *Utiliser données onglet "Longueur"*. Si cette option est cochée la longueur du câble est calculée automatiquement à partir des cheminements indiqués sur la carte et des paramètres de l'onglet *Longueur*. Si cette option est décochée il faut entrer la longueur manuellement ; cela est utile, par exemple, quand le point de raccordement au réseau se trouve en dehors des limites de la carte, il suffit alors de placer l'objet *Réseau-externe* arbitrairement sur la carte et d'entrer manuellement la longueur du câble raccordant le parc au réseau électrique.
Note : le calcul automatique de la longueur prend en compte les dénivelés (s'il existe un objet *Données-lignes* contenant les courbes de niveau). Le calcul des dénivelés se fait à partir de l'altitude des points formant le cheminement du câble sans tenir compte des courbes de niveau entre les points, il faut, par conséquent, lors du tracé veiller à entrer suffisamment de points.
- *Utiliser données onglet "Facteurs limitant le courant"*. Si cette option est cochée le *Facteur de limitation* est calculé automatiquement à partir des paramètres de l'onglet *Facteurs limitant le courant*. Si cette option est décochée il faut entrer le *Facteur de limitation* manuellement. Plus d'information sur le calcul de ce facteur sont données dans la suite.
- *Nombre de systèmes en //*: ici un système est un câble tripolaire ou trois câbles unipolaire (posés en trèfle ou à plat)

- *Section nécessaire (mm²) pour* : donne la section nécessaire dans le cas typique de systèmes trois câbles unipolaires en trèfle (N2XS(F)2Y ou NA2XS(F)2Y. Plus d'information sur le calcul des sections est donnée dans la suite.

Onglet *Longueur* (voir Figure 25)

Cet onglet permet d'ajuster la longueur calculée à partir du cheminement du câble en ajoutant :

- un pourcentage supplémentaire pour prendre en compte la flèche des lignes et l'imprécision sur la réalisation des tranchés. La valeur du pourcentage s'indique dans le champ *Sup. long (%)*.
- une longueur fixe pour tenir compte des suppléments de câble nécessaires aux raccordements. Cette longueur s'indique dans le champ *Sup. raccord.*

Propriétés du câble ou de la ligne

Données
De: <6> Transformateur, <0,8 (MVA)> (1), (LO'
à: <1> E1

Choix du câble: Pirelli_NYY_Cu_185_1_50.Cable [Modifier]

Remplacer val. bibliothèque par val. utilisateur dans calculs
 Utiliser section calculée et caractéristiques génériques

Principales caractéristiques eDonnées | Source/description:

	Val. Bibliothèque	Valeurs utilisateur
Résistance R' (Ohm/km)	0,0991	0,0991
Réactance X' (Ohm/km)	0,0902	0,0902
Susceptance B' (μS/km)	0	450
Courant max. (A) :	341	341

Résultats:

Pertes à 100% de charge	66,952	(kW/km)
Pertes à 50% de charge	16,738	(kW/km)
Capacité	0,818	(MVA)
Chute tens. 100% charge	84,021	(V/km)

Longueur | Facteurs limitant le courant

Longueur actuelle sur la carte (m): 442,65

	Sup. long. (%)	Sup. raccord.
Ligne aérienne	2,00	20
Câble	0,50	5

Conv. en val. par déf. [EMD par défaut] [Enregist. dans Bibliothèque]

Figure 25

Onglet *Facteurs limitant le courant* (voir Figure 27)

Cet onglet sert à décrire les facteurs liés à l'environnement du câble qui sont susceptibles de réduire intensité maximale du courant qui peut le traverser. La négligence de ces facteurs peut conduire à des surchauffes du câble qui accéléreront son vieillissement et qui dans les cas extrêmes pourront le détruire.

- *Température ambiante à 0,7m de profondeur (°C)* : cette valeur est entrée de manière indirecte en utilisant le menu suivant :

5
10 - valeur min pour les climats tempérés
15 - valeur min pour les climats subtropicaux
20 - valeur max pour les climats tempérés
25 - valeur min pour les climats tropicaux
30 - valeur max pour les climats subtropicaux
35
40 - valeur max pour les climats tropicaux

- *Nombre de systèmes de câbles*. Note importante : ce nombre peut être différent de celui indiqué dans l'onglet *Principal*, en effet, la tranchée peut contenir d'autres câbles sans rapport avec ceux l'étude ou bien les câbles de l'étude sont enterrés dans des tranchées différentes.

A partir des informations provenant de plusieurs fabricants de câbles, l'hypothèse que la distance moyenne séparant deux systèmes posés en parallèle est de 7 cm a été faite. Si ce n'est pas le cas l'utilisateur devra adapter les résultats obtenus en conséquence.

- *Pose du câble* prend en compte la manière dont est posée le câble, enfouit *Directement dans la terre* ou en *Conduit*, ainsi que la dimension des câbles.
- *Résistivité thermique du sol* détermine la capacité du sol à dissiper la chaleur produite par le câble et par conséquent sa température.

On distingue autour du câble une *Zone sèche*, asséchée par la chaleur du câble, et une *Zone humide*, non influencée par la chaleur du câble, caractéristique du terrain, voir Figure 26.

Un menu déroulant facilite la saisie des caractéristiques relatives à ces deux zones. Le menu de la *Zone sèche* offre en plus une entrée *Câble reposant sur lit de sable* pour tenir compte du cas courant où le câble n'est pas enfoui à même le sol.

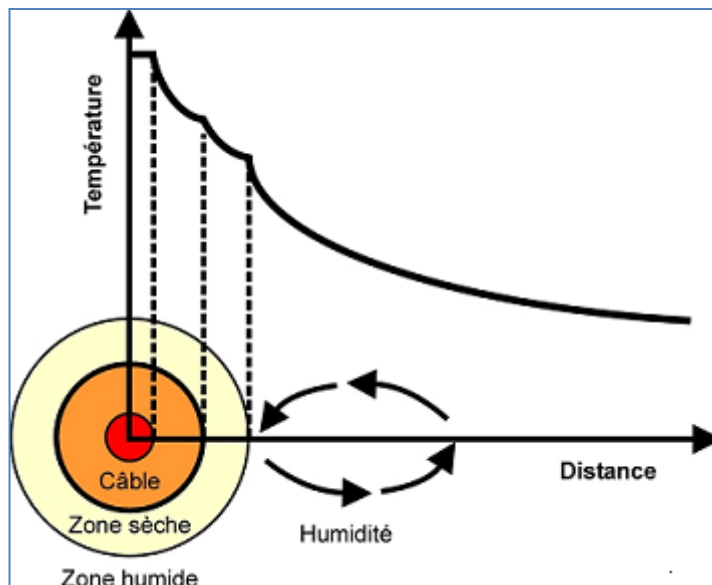


Figure 26

- *Facteur de charge*. Les constructeurs indiquent le courant maximal supporté par un câble dans les conditions de son utilisation dans un réseau de distribution électrique, appelées *Utility load*. Par exemple un câble dont l'*Utility Load* est de 100A peu supporter des pics de courant de 100A quand il est utilisé dans un réseau électrique (car la puissance moyenne à laquelle est soumis le réseau est environ 0,7 fois la puissance pic). Cette manière de définir la capacité d'un câble et le fait que les éoliennes peuvent débiter à puissance maximale de manière continue a conduit à mettre en place ce *Facteur de charge* dont la valeur maximale est automatiquement limitée à 0,81.

A partir de l'ensemble des facteurs qui viennent d'être décrits est calculé le *Facteur global de limitation du courant*; il n'est calculé que pour les câbles; dans le cas des lignes aériennes il peut être forcé manuellement dans l'onglet *Principal*.

Le calcul du *Facteur global de limitation du courant* ne s'appuie en détail sur aucune norme particulière. Les fabricants donnent rarement une information exhaustive permettant le calcul de ce facteur et par conséquent les données nécessaires ont été constituées en combinant l'information de plusieurs fabricants de câbles.

De plus ces facteurs ont été considérés indépendants les uns des autres ce qui n'est pas toujours le cas.

Le *Facteur global de limitation du courant*, bien que non exact, permet, néanmoins, de dimensionner les câbles avec une excellente précision.

Figure 27

Caractéristiques du câble

Choix du câble : ce menu propose l'option *<Bibliothèque...>* qui permet de choisir un câble dans la *Bibliothèque des câbles* et l'option *<Défini par l'utilisateur>* qui permet à l'utilisateur d'entrer les caractéristiques du câble. Un câble défini par l'utilisateur peut être ajouté à la *Bibliothèque des câbles* en cliquant sur le bouton *Enregistrer dans la Bibliothèque*.

Remplacer les valeurs bibliothèque par les valeurs utilisateur dans les calculs : si on utilise un câble de la bibliothèque, cette option permet d'introduire des *Valeurs utilisateur* qui seront employées dans les calculs à la place de celles de la bibliothèque ; cela évite créer un câble totalement nouveau, voir Figure 25.

Utiliser la section calculée et les caractéristiques génériques : si cette option est cochée WindPRO utilisera un câble dont il a calculé la section (il prend la plus forte du cadre *Section nécessaire*) et les caractéristiques électriques. Comme pour les transformateurs, l'analyse des caractéristiques de nombreux câbles et lignes aériennes, a permis d'établir des formules qui permettent à WindPRO de calculer automatiquement des valeurs génériques. Néanmoins, en décochant cette l'option l'utilisateur à la possibilité d'entrer ses propres valeurs.

Onglet *Principales caractéristiques* (voir Figure 24) :

Si dans le menu *Choix du câble* vous avez opté pour *<Défini par l'utilisateur>*, il faudra renseigner les champs *Câble/Ligne aérienne*, *Isolant*, *Conducteur*, *Section du conducteur* (si l'option *Utiliser la section calculée et caractéristiques génériques* n'est pas cochée), *Tension nominale*, *Fréquence* et *Nbre de conducteurs* (1 câble triphasé ou 3 câbles unipolaires).

Onglet *eDonnées* (voir Figure 25)

Cet onglet présente les caractéristiques électriques du câble.

Comme indiqué antérieurement, si on utilise un câble de la bibliothèque et si l'option *Remplacer les valeurs bibliothèque par les valeurs utilisateur dans les calculs* est cochée on peut introduire des *Valeurs utilisateur* qui seront employées dans les calculs à la place de celles de la bibliothèque.

Onglet *Source/Description* (voir Figure 27)

Si vous avez choisi un câble dans la bibliothèque, cet onglet montre le contenu des champs *Source*, *Date* et *Description* de la fiche du câble.

10.1.7.1 Outil de calcul de la section des câbles

eGRID intègre un outil de calcul automatique de la section des câbles dont les résultats sont présentés dans le cadre *Section nécessaire (mm²) pour* : de l'onglet *Principal*, voir Figure 24.

L'outil calcule la section (mm²) à partir du *Conducteur* choisi (cuivre ou aluminium), de la *Puissance planifiée* (qui peut calculée automatiquement ou définie par l'utilisateur), de la *Chute de tension maximale* et des hypothèses suivantes :

- *Nbre de conducteurs* : 3 câbles de 1 conducteur posés en trèfle,
- Température maximale du câble 90°C,
- Plage de tension (10-70kV),
- Mise à la terre aux deux extrémités,
- Profondeur d'enfouissement : 0,7 m,
- Des *Facteurs limitant le courant* dont les valeurs par défaut sont les suivantes :
 - Température ambiante à 0,7m de profondeur : 20°C,
 - Pose du câble directement dans la terre,
 - Résistivité thermique du sol Zone humide : 1,0 Km/W,
 - Résistivité thermique du sol Zone sèche : 2,5 Km/W,
 - Facteur de charge : 1,0.

L'outil calcule les sections nécessaires pour écouler *Puissance planifiée*, pour respecter *Chute de tension max.* et pour écouler la *Puissance de CC* (qui dépend du réseau électrique).

Si l'option *Utiliser la section calculée et les caractéristiques génériques* est cochée alors l'outil impose la section la plus importante parmi les trois sections mentionnées antérieurement. De plus, il recalcule automatiquement les sections quand les cheminements des câbles sont modifiés.

Quand le cheminement d'un câble est définitivement établi vous pouvez :

- conserver la section la plus importante,
- si la section la plus importante ne vous paraît pas pertinente, car, par exemple, vous ne souhaitez pas surdimensionner le câble pour résister à la puissance de court-circuit, décochez l'option *Utiliser la section calculée et les caractéristiques génériques* et cliquez sur le bouton *Utiliser* à droite de la section que vous souhaitez utiliser,
- choisir dans la *Bibliothèques des câbles* un câble de section normalisée est égale ou supérieure à la section calculée (c'est typiquement la manière de procéder car les sections calculées ne sont pas normalisées).

Pour que le calcul des sections soit pertinent, il faut auparavant avoir raccordé toutes les éoliennes du parc, en effet la *Puissance planifiée* quand elle calculée automatiquement est la somme des puissances des éoliennes.

10.1.8 Bibliothèque des câbles

La *Bibliothèque des câbles* s'utilise de la même manière que la *Bibliothèque des transformateurs* présentée au 10.1.3.

10.1.9 Tableau eGRID



Le *Tableau eGRID*, voir Figure 28, offre une autre présentation et une autre manière de travailler sur le câblage. L'accès à ce tableau se fait par le bouton *Tableau eGRID* situé dans la barre d'outils à gauche de l'écran. Dans le cas où plusieurs objets *Câblage-électrique* sont utilisés dans le même projet, WindPRO demandera de choisir l'objet dont on veut présenter le *Tableau eGRID*.

Longueur	De l'objet	A l'objet	Fact. lim.	Description du câble
18012	<4> Réseau-externe (1)	<5> Jeu-de-barres, <30 (kV)> (1)	1	<30 kV>, <35 mm ² >, <Al>
5096	<5> Jeu-de-barres, <30 (kV)> (1)	<1> E1	1	<30 kV>, <35 mm ² >, <Al>
539	<2> E2	<1> E1	1	<0 kV>, <35 mm ² >, <Al>
3682	<5> Jeu-de-barres, <30 (kV)> (1)	<6> Charge P=0,90 (MW) Q=0,44 (MVA)	1	<30 kV>, <35 mm ² >, <Al>

Figure 28

Le bouton *Modifier câbles cochés* permet de modifier plusieurs câbles simultanément. Pour cela, il faut cocher les câbles à modifier, cliquer sur ce bouton qui ouvre la fenêtre *Propriétés du câble ou de la ligne* (voir Figure 24) et faire les modifications voulues dans cette fenêtre.

Notez qu'à l'issue de cette opération tous les câbles sélectionnés prendront les caractéristiques présentées dans la fenêtre *Propriétés du câble ou de la ligne*.

Le bouton *Créer un nouveau câble* ouvre également la fenêtre *Propriétés du câble ou de la ligne* dans laquelle se définissent les caractéristiques du nouveau câble et ses points de raccordement à l'aide des menus déroulants *De* et *à* qui montrent la liste des objets raccordables.

Le bouton *Supprimer câbles cochés* n'appelle pas d'explication particulière.

Auto-cocher câbles sélectionnés sur la carte, quand cette option est cochée si on sélectionne un câble sur la carte il apparaît coché dans le *Tableau eGRID* et inversement.

Le bouton *Rafraichir val. génériques* permet de mettre à jour le *Tableau eGRID* quand des modifications sont faites sur la carte (lors d'un changement du cheminement d'un câble, par exemple).

Le bouton *Créer un nouvel objet* permet de créer des objets qui n'apparaissent pas sur la carte. Cette possibilité est utile pour traiter une hypothèse telle que « le parc sera être connecté par une ligne d'environ 5 km au réseau électrique dont les caractéristiques au point de raccordement sont les suivantes... ».

10.2. Calculs

10.2.0 Introduction aux calculs

Après avoir défini l'infrastructure électrique du parc, il faut passer à la fenêtre *Calculs et rapports* et lancer le calcul en cliquant sur la flèche verte (jaune indique que vous n'avez pas de licence) devant *eGRID* (*dimensionnement, pertes, perturbations du réseau, etc.*) qui ouvre la fenêtre *Définir Calcul* de la Figure 29 à partir de laquelle se fait la sélection des calculs et leur paramétrage.

10.2.1 Onglet Principal

C'est dans cet onglet, voir Figure 29, que se fait la sélection des calculs à effectuer (*Pertes, Vérification du dimensionnement, etc.*) et le choix des normes ou directives à utiliser.

Figure 29

Le champ *Nom* permet de donner un nom au rapport produit par le calcul.

Sous *Utiliser norme/directive* se trouvent deux menus déroulants :

- Le menu *Pour les tolérances* permet de choisir la référence par rapport à laquelle les résultats des calculs seront comparés. Cette référence peut être une norme ou bien peut être définie par l'utilisateur.
- Le menu *Pour les calculs* permet de sélectionner les hypothèses de calcul ; celles-ci peuvent être définies par l'utilisateur ou suivre les recommandations d'une norme (dans ce menu, il convient de choisir *Défini par l'utilisateur* et de choisir les hypothèses de calcul individuellement dans les menus en face de chaque calcul).

Les normes suivantes sont disponibles : VDEW, IEC 61000 et VDE0102/IEC 60909 (incluant dans les deux cas les variantes de 1990 et 2001).

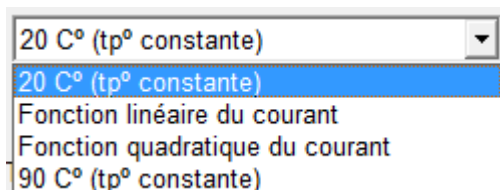
Sous *Calculer* se fait la sélection des calculs à effectuer.

Le choix d'un calcul fait apparaître, dans la fenêtre *Définir calcul* un onglet supplémentaire, portant le nom du calcul où se fait le paramétrage des hypothèses de calcul. Si dans le menu déroulant à droite du calcul coché, vous choisissez *Défini par l'utilisateur* les hypothèses de calcul sont librement paramétrables, sinon les hypothèses de la norme choisies seront affichées mais ne seront pas modifiables.

Utiliser les paramètres de calcul par défaut : si cette option n'est pas cochée alors le *Nombre d'itérations max* et la *Précision de calcul dP/MW* peuvent être modifiés, si nécessaire.

tp° des câbles utilisée dans les calculs :

En général, dans les calculs, on utilise les directement les caractéristiques des câbles fournies par les fabricants ; ces caractéristiques sont spécifiées à une température de 20°C.



Etant donné que le passage d'un courant dans un câble augmente sa tp° et par conséquent sa résistance, ce menu propose de tenir compte des effets de la température via les options présentées à la Figure 30.

Figure 30

D'une part, on fait l'hypothèse que la température du câble quand il n'est traversé par aucun courant est de 20°C et d'autre part on limite le courant maximal à la valeur qui porte le câble à une température de 90°C (cf. *Facteurs de limitation du courant*).

La variation de la température (dans la plage 20-90°C) en fonction du courant traversant le câble peut être choisie linéaire ou quadratique et à partir de la température obtenue on peut calculer la résistance du câble qui à son tour permettra de calculer les pertes, voir Figure 31.

La résistance du câble est calculé en appliquant $R_t = R_{20}[1+0,04(t-20)]$ où R_{20} est la résistance du câble à 20°C et R_t est la résistance du câble à une température t .

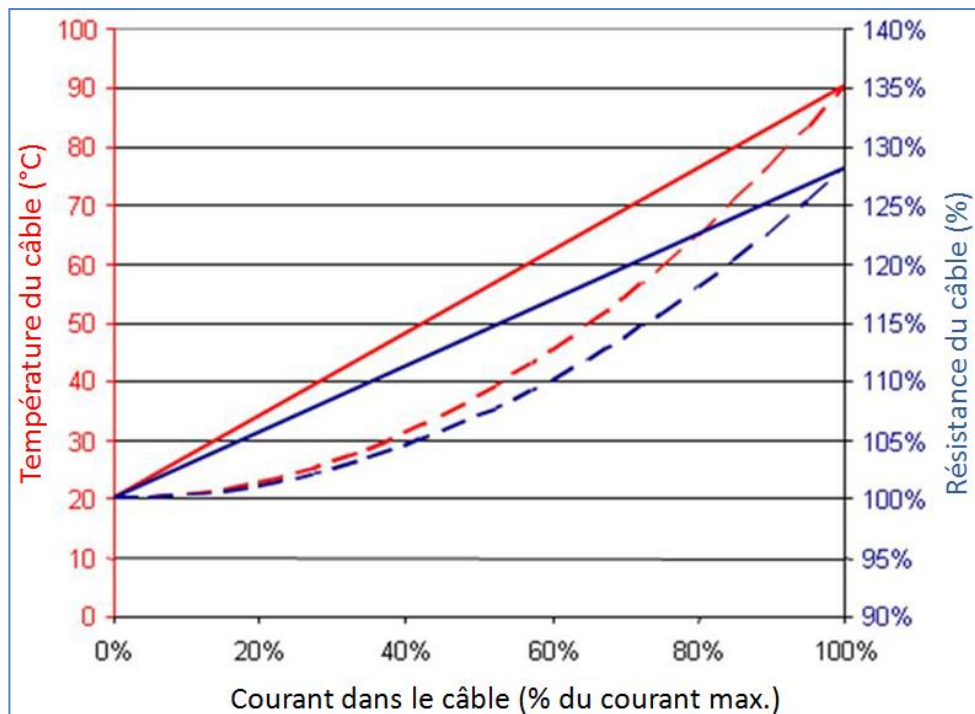


Figure 31

Fonction quadratique du courant est le choix le plus réaliste car les pertes Joule responsable de l'augmentation de tp° croissent proportionnellement au carré du courant.

La partie droite de l'onglet *Principal* montre des hypothèses nécessaires aux calculs dont les propositions présentées par défaut peuvent être modifiées par l'utilisateur :

- *Noeud où la tension est spécifiée pour les calculs des pertes, de la variation de tension et pour la vérification du dimensionnement (hypothèses de charge 1)* : une situation de départ est nécessaire pour le calcul des variations de tension ; à cet effet, on définit arbitrairement le point de fonctionnement des éoliennes (typiquement éoliennes non couplées au réseau) et la tension correspondante en un noeud (typiquement au noeud de raccordement avec le réseau électrique, *Réseau-externe*).
- *Noeud où la tension est constante quelques soient les hypothèses de charge* : le noeud où la tension ne varie pas est typiquement celui du générateur interne du réseau électrique, appelé ici *Générateur éloigné*. Connaissant la tension en un point, connaissant la puissance de CC et l'angle d'impédance (*Psi*) du réseau électrique au point de raccordement WindPRO va calculer la tension du générateur interne du réseau électrique. Une fois la tension du générateur interne du réseau électrique établie toutes les données nécessaires aux calculs des *Pertes*, de la *Vérification du dimensionnement* et de la *Variation de tension* seront présentes.
- *Utiliser le CosPhi suivant pour les éoliennes sans données eGRID* : les éoliennes dont fiche ne contient pas données eGRID se verront attribuées le CosPhi indiqué dans ce champ.
- *Forcer les CosPhi à cette valeur* : en cochant cette option toutes les éoliennes, mêmes celles ayant de données eGRID, se verront attribuées le CosPhi du point précédent.

10.2.2 Onglet Objets réseau

eGRID utilise tous les objets des calques actifs (c.à.d. dont les objets sont visibles). On peut mettre à profit cette possibilité pour créer plusieurs topologies de câblage et différents points de raccordement au réseau électrique et choisir directement la configuration objet du calcul directement sous l'onglet *Objets réseau*, voir Figure 32. Cela permet de tester différentes configurations sans repasser par la fenêtre des *Cartes et Objets*.

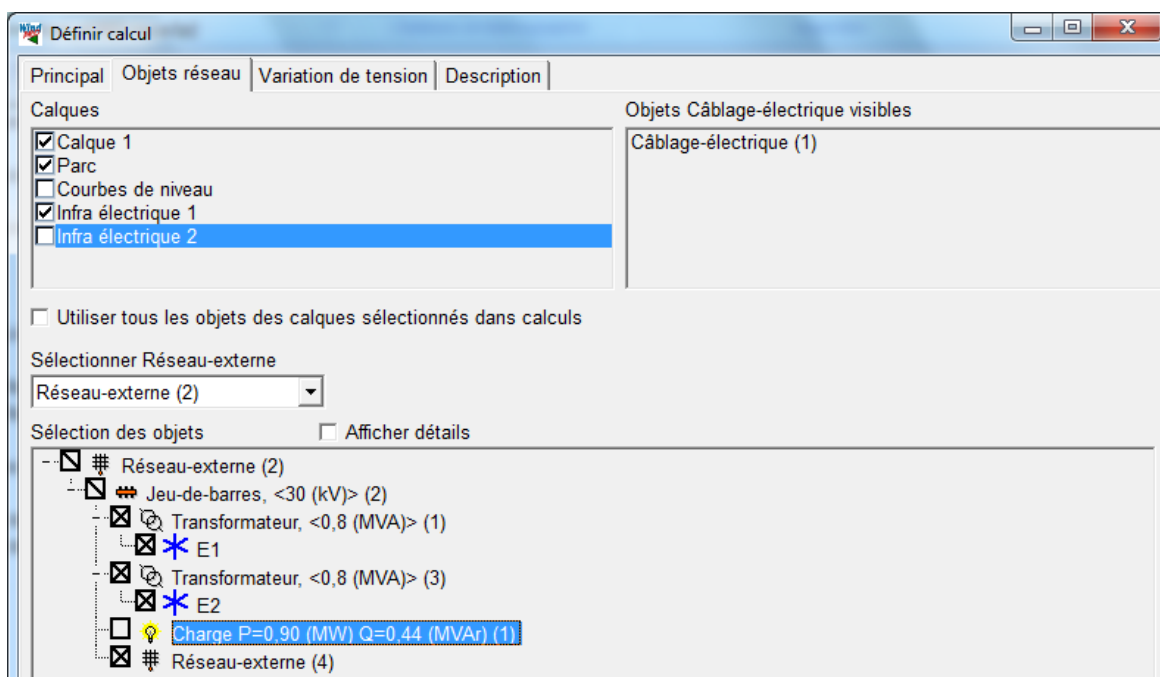


Figure 32

En décochant *Utiliser tous les objets des calques sélectionnés dans les calculs*, on peut éliminer individuellement des objets du calcul en les décochant dans le cadre *Sélection des objets*.

Si le parc est raccordé en plusieurs points au réseau électrique, il faut choisir le point à utiliser pour le calcul dans le menu déroulant *Sélectionner Réseau-externe*.

Etant donné qu'eGRID ne peut pas calculer des réseaux maillés, chaque fois qu'une boucle est détectée un message invitant l'utilisateur à faire les corrections idoines s'affiche.

10.2.3 Onglet Pertes

Les pertes électriques dans les câbles et les transformateurs peuvent être calculées à partir des caractéristiques du vent ou à partir du productible du parc.

Le calcul à partir des caractéristiques du vent se fait en cochant l'option *Utiliser la distribution du vent*, voir Figure 33.

Quand l'option *Avancé* est cochée, en plus de valeurs de A et de k on peut introduire la *Hauteur de mesure* à laquelle se rapportent ces valeurs ainsi que l'*Exposant du gradient du vent* (voir la section 3) ce qui permet d'utiliser à partir d'une *Vmoy du vent* différente de celle à hauteur de moyeu.

Figure 33

Le calcul à partir du productible du parc se fait en cochant l'option *Utiliser le productible*, voir Figure 34.

Pour ce calcul, il faut entrer le *Productible du parc* et le *Paramètre k* donnant la forme de la distribution du vent. A partir de ces informations et des courbes de puissance des éoliennes du parc (que WindPRO réduit, pour ce calcul, à 12 classes de vent) est calculé le paramètre A de la distribution des vitesses du vent à la hauteur du moyeu des éoliennes et on se retrouve dans la situation antérieure.

Si l'option *Avancé* est cochée, WindPRO donnera la valeur de A dans le rapport. Cette valeur sera calculée à la hauteur spécifiée dans le champ *Haut. calcul de A*; ce calcul requiert de renseigner le champ *Exposant du gradient du vent*. On peut ainsi reconstituer les caractéristiques du vent à partir du productible, ce qui permet, à son tour, de pouvoir faire les calculs des pertes avec d'autres hauteurs de moyeu.

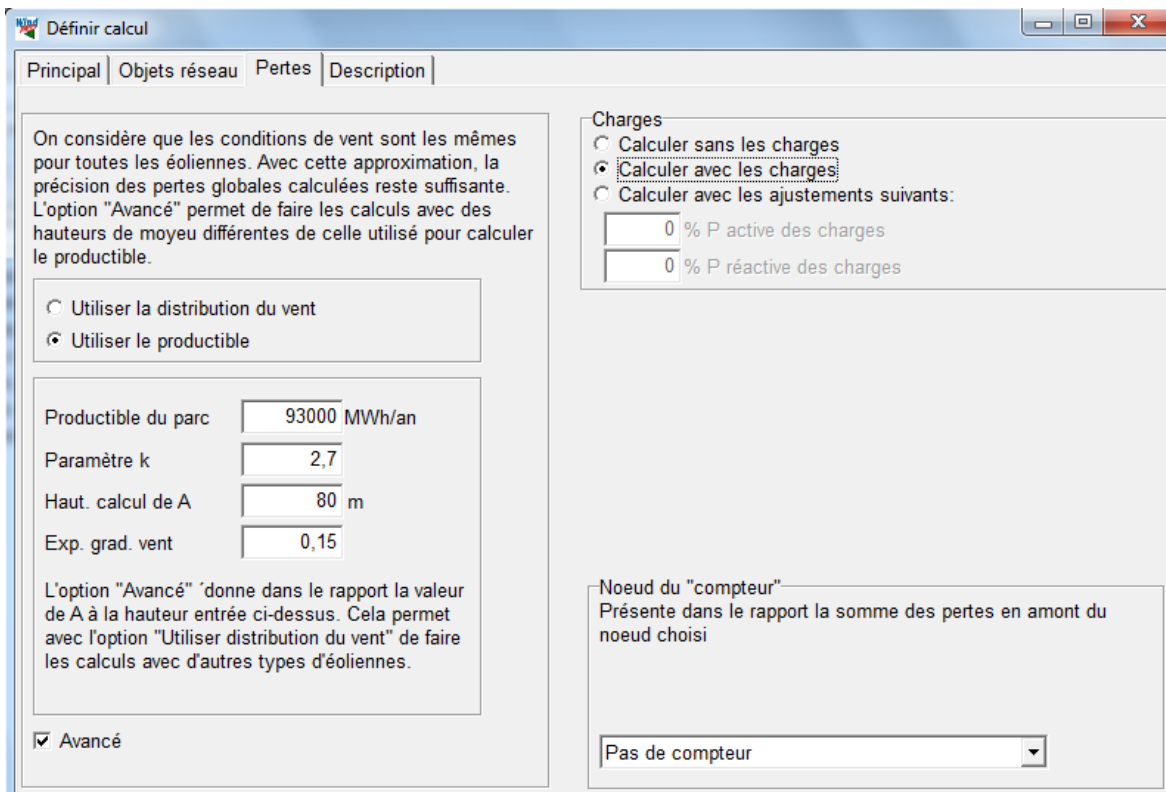


Figure 34

10.2.4 Onglet Vérification du dimensionnement

Dans la partie droite de l'onglet *Vérification du dimensionnement*, voir Figure 35, se définissent le *Point de fonctionnement des éoliennes* et les autres conditions dans lesquelles se fera la vérification.

Ces conditions sont prédéfinies et non modifiables si dans l'onglet *Principal* une norme a été choisie.

Par contre, si dans l'onglet *Principal* l'option *Défini par l'utilisateur* est choisie, alors les conditions sont totalement paramétrables.

Si dans les données eGRID des éoliennes utilisées les valeurs *Pmax courbe de puissance*, *Pmax 10mn*, etc., ne sont pas présentes, elles seront déterminées à partir de la puissance nominale multipliée les coefficients entre parenthèses. Les coefficients par défaut peuvent être changés en cliquant sur le bouton *Modifier coefficients*.

En cochant l'option *Défini par l'utilisateur* du cadre *Point de fonctionnement des éoliennes*, on peut même traiter le cas où les éoliennes se comportent comme des charges, à condition d'avoir été préalablement entré dans les données eGRID des éoliennes sous l'onglet *CosPhi* une valeur dans la ligne *Load*.

Le cadre *Charges* permet d'indiquer si le calcul de vérification doit être fait avec les charges, sans les charges ou avec des fractions de charge.

Dans la partie gauche de l'onglet sont rappelées les *Tensions nominales*, leur *Limite inférieure* et leur *Limite supérieure* telles qu'entrées dans l'objet *Réseau-externe*.

Si les valeurs des tensions effectivement livrées sont différentes des valeurs nominales, elles devront être indiquées dans la colonne *Tension livrée*. Les limites indiquées s'appliqueront alors aux *Tensions livrées*.

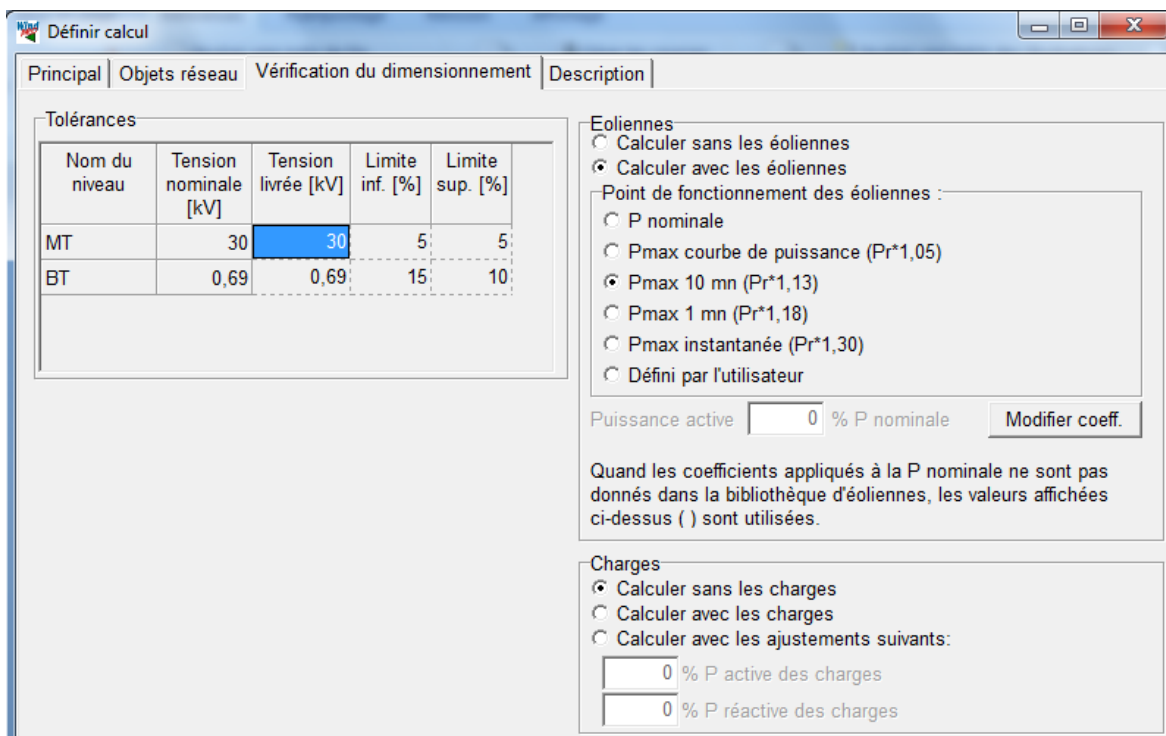


Figure 35

10.2.5 Onglet Variation de tension

Dans l'onglet *Variation de tension* se fait le paramétrage du calcul de la variation de tension (en chaque nœud du parc). La variation, ici considérée, est la différence de tension entre deux points de fonctionnement statiques du parc, typiquement le fonctionnement à pleine charge et le fonctionnement à vide. Ces deux points de fonctionnement se définissent dans les sous-onglets *Hyp. Charge 1* et *Hyp. Charge 2*.

Les variations de tension calculées sont comparées aux valeurs de la colonne *Tolérances [%]* et les tensions calculées aux valeurs des colonnes *Limite sup. [%]* et *Limite inf. [%]* afin de vérifier qu'elles restent dans l'intervalle prescrit.

Le paramétrage des sous-onglets *Hyp. Charge 1* et *Hyp. Charge 2* est identique à celui décrit dans *Vérification du dimensionnement*.

Les Figure 36 et Figure 37 montrent le paramétrage quand les recommandations de la norme VDEW sont appliquées.

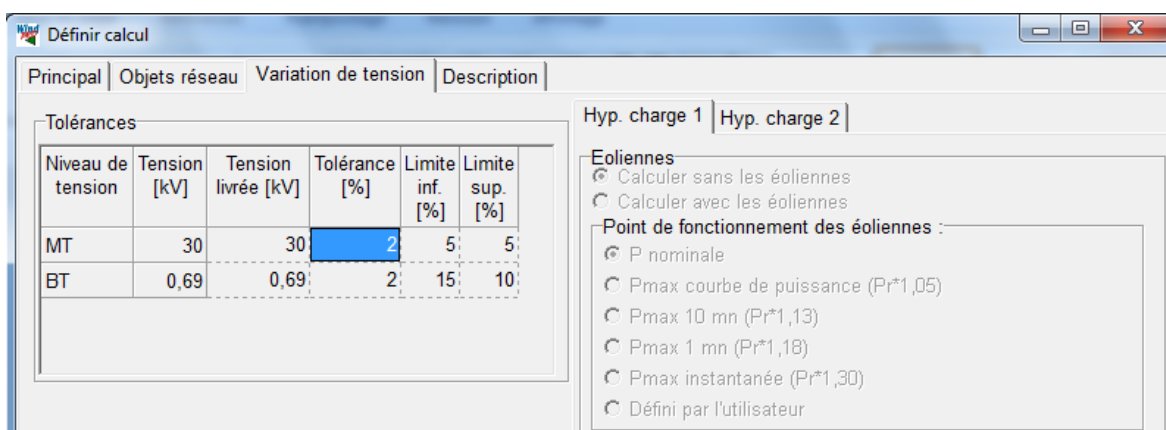


Figure 36

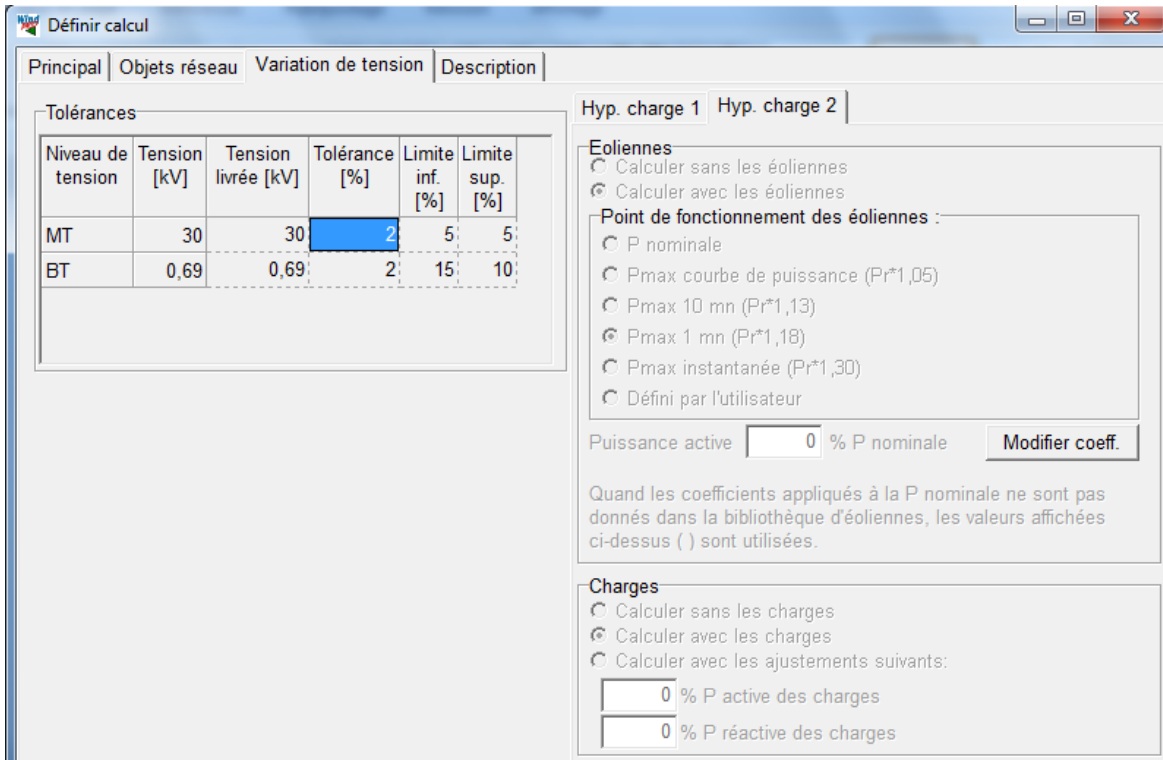


Figure 37

10.2.6 Onglet Courants de court-circuit

Les calculs *Pertes*, *Vérification du dimensionnement* et *Variation de tension* mettent en œuvre des calculs de répartition de charges (load-flow). Les autres calculs *Courants de court-circuit*, *Flicker à long terme* et *Perturbations dues aux couplages* sont basés sur le calcul des puissances de court-circuit.

Dans l'onglet *Courant de court-circuit*, voir Figure 38, il est possible de limiter les calculs en sélectionnant *Un seul calcul*, *Avec éoliennes* ou *Sans éoliennes*.

En cochant l'option *Calculer la répartition du courant*, eGRID calcule, à partir d'une situation de court-circuit donnée, la valeur du courant dans chaque branche du réseau.

En cochant les options *Transformateurs* et/ou *Générateurs synchrones* du cadre *Correction d'impédance VDE/IEC*, les impédances de ces éléments sont réduites conformément aux spécifications définies dans les normes VDEW 0102 (révision 2001) et IEC 60909 (révision 2001 également) et par conséquent les valeurs des courants de court-circuit sont plus élevées.

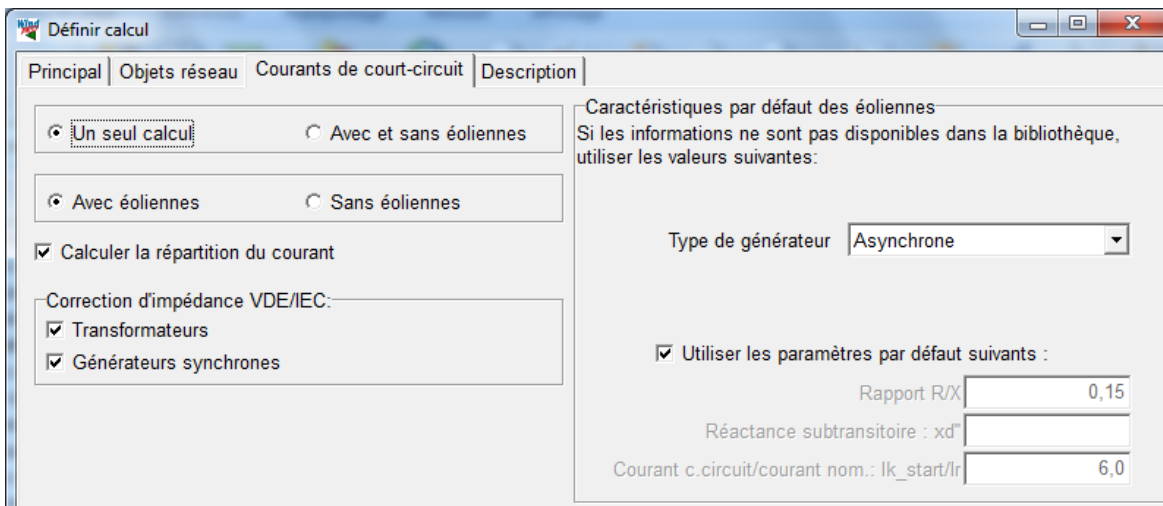


Figure 38

10.2.7 Onglet Flicker à long terme

La Figure 39 présente le contenu de l'onglet *Flicker à long terme*.

La partie gauche présente les paramètres du calcul. Selon les choix faits dans l'onglet *Principal* (*Défini par l'utilisateur* ou norme) ils seront modifiables ou pas.

Le *Facteur d'interaction* intervient dans la formule qui détermine le flicker total à partir du flicker produit par chaque éolienne (sa valeur est normalement égale à 2).

Le *Niveau de flicker à long terme, Plt_{max} , toléré* dépend de la norme utilisée.

Le niveau du flicker produit par une éolienne dépend de la puissance de court-circuit du réseau au point de raccordement de celle-ci. La puissance de court-circuit dépend du courant de court-circuit qui lui-même dépend de l'impédance des transformateurs d'où l'option *Correction d'impédance* qui permet de faire le calcul dans les conditions des anciennes normes ou des normes de 2001.

La partie droite sert à introduire le *Coefficient de flicker, c* qui sera utilisé par défaut si l'information correspondante n'est pas disponible dans les données eGRID des éoliennes.

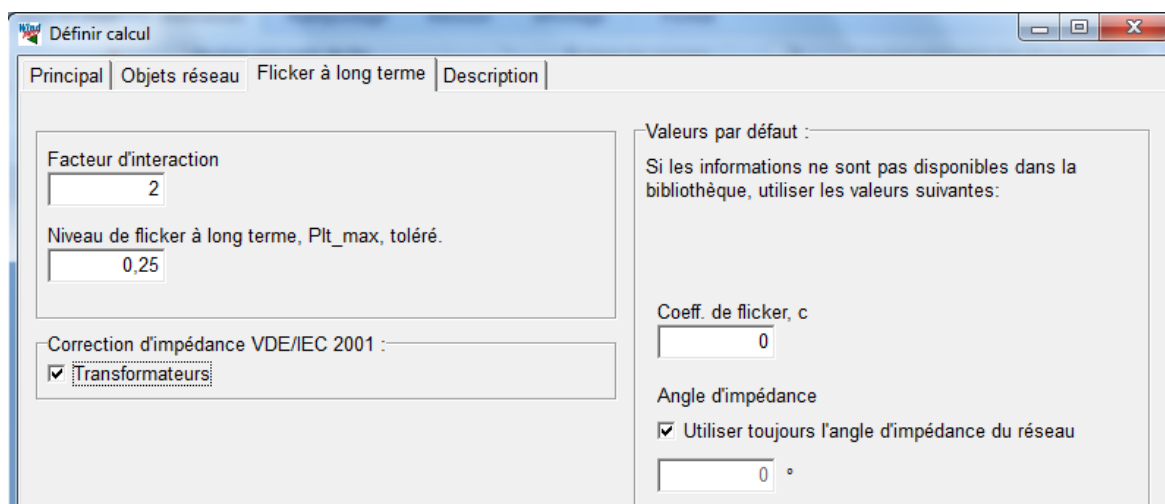


Figure 39

10.2.8 Onglet Perturbations dues aux opérations de couplage

Dans cet onglet, voir Figure 40, se fait le paramétrage des calculs des variations de tension et du flicker produits par les opérations de couplage et découplage des éoliennes.

Dans la partie gauche on trouve les *Tolérances* de variation de la tension et la possibilité d'appliquer la *Correction d'impédance VDE/IEC* aux *Transformateurs* comme préconisé par la révision 2001 des normes.

Le calcul de flicker est optionnel, il n'est calculé que si l'option *Contribution des opérations de couplage au flicker* est cochée.

Selon les choix faits dans l'onglet *Principal* (*Défini par l'utilisateur* ou norme) les paramètres seront modifiables ou pas.

La partie droite présente diverses options concernant les facteurs k_i et k_u utilisés pour le calcul des variations de tension et k_f utilisé pour le calcul du flicker (voir 10.1.4) et des champs permettant d'entrer les valeurs de k_i , k_u , k_f et le *Nombre max de couplages/découplages* si l'information correspondante n'est pas disponible dans les données eGRID des éoliennes.

Définir calcul

Principal | Objets réseau | Perturbations dues aux couplages | Description

Tolérances

Niveau de tension	Tension [kV]	Tolérance [%]
MT	30	2
BT	0,7	2

Correction d'impédance VDE/IEC:

Transformateurs

Contribution des opérations de couplage au flicker

Facteur d'interaction

Flicker à long terme max, Plt_max

Valeurs à utiliser :

Si les données sont disponibles :

Calculer les valeurs de k_i (FGW) ou de k_u (MEASNET/IEC) par interpolation. Tableau $k_i=f(\psi)$ ou $k_u=f(\psi)$ requis.

Utiliser la valeur max de k_i (FGW) ou de k_u (MEASNET/IEC)

Si les informations ne sont pas disponibles dans la bibliothèque, utiliser les valeurs suivantes:

k_i (FGW), k_u (MEASNET/IEC)

Valeurs par défaut :

Si les informations ne sont pas disponibles dans la bibliothèque, utiliser les valeurs suivantes:

Facteur de flicker, k_f

Nombre max de couplages/découplages

Figure 40

10.3. Rapports

Les rapports des calculs eGRID apparaissent, comme il est habituel dans WindPRO, dans le cadre *Nom* de la fenêtre *Calculs et rapports*. L'arborescence présentée à la Figure 41 résulte de calculs individuels lancés successivement : *Verif. Du dimensionnement*, puis *Variation de tension*, etc. L'arborescence se présenterait différemment si tous les calculs avaient été lancés en même temps.

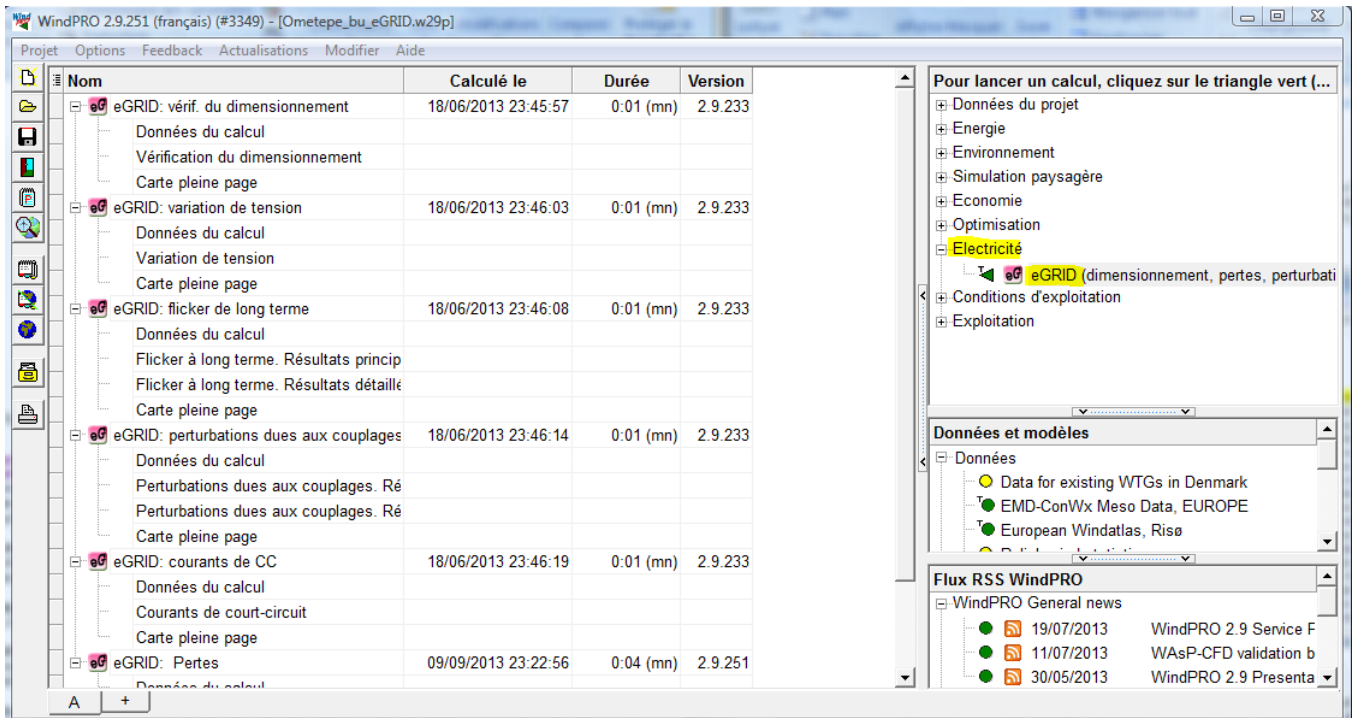


Figure 41

Rapport Pertes : les sections *Pertes. Résultats principaux* et *Pertes. Résultats détaillés* du rapport présentent respectivement la synthèse et l'analyse des résultats. Les pertes annuelles dans l'infrastructure électrique du parc sont exprimées en pourcentage du productible dans la synthèse et en valeurs absolues actives et réactives pour chaque câble et chaque transformateur dans l'analyse.

Rapport Vérification du dimensionnement : le résultat de l'analyse du dimensionnement est donné dans le paragraphe *Taux d'utilisation* qui présente le *Taux de charge* de chaque élément de l'infrastructure. Si le *Taux de charge* dépasse 100% le résultat est signalé *Hors limites*. D'autres résultats se rapportant aux tensions et aux pertes sont également présentés dans ce rapport.

Rapport Variation de tension : la variation de tension en chaque nœud, résultant des calculs avec les deux hypothèses de charge définies, est présentée et comparée à la tolérance dans le paragraphe *Résultats*. Le rapport présente aussi l'analyse des tensions en chaque nœud pour les deux hypothèses de charges ainsi que d'autres résultats se rapportant aux taux d'utilisation et aux pertes.

Rapport Courants de court-circuit : le paragraphe *Résultats* présente pour chaque nœud de l'infrastructure les valeurs du courant de court-circuit, de l'angle d'impédance et de la puissance de court-circuit. Ces valeurs varient suivant les options de calcul choisies (avec ou sans éoliennes, avec ou sans correction d'impédance). Si l'option correspondante été sélectionnée lors du paramétrage du calcul, la répartition des courants dans l'infrastructure lors d'un court circuit est présentée dans le paragraphe *Répartition du courant*.

Rapport Flicker à long terme : comme dans le rapport *Pertes*, les résultats sont présentés sous forme de synthèse et sous forme d'analyse respectivement dans les sections *Flicker à long terme. Résultats principaux* et *Flicker à long terme. Résultats détaillés*. Dans la section *Résultats principaux* le niveau de flicker en chaque nœud de l'infrastructure est comparé avec la tolérance ; la puissance de court-circuit en chaque nœud ayant

servi au calcul du flicker est également présentée dans cette section. La section *Résultats détaillés* présente la contribution de chaque éolienne à valeur totale du flicker en chaque nœud.

Rapport *Perturbations dues aux couplages* : ce rapport est organisé comme le rapport *Flicker à long terme*. Dans la section *Résultats principaux* la variation de tension maximale et le niveau de flicker maximal en chaque nœud de l'infrastructure sont comparés aux tolérances ; la puissance de court-circuit en chaque nœud ayant servi aux calculs du flicker et de la variation de tension est également présentée dans cette section. La section *Résultats détaillés* présente en plus, pour tous les nœuds, les valeurs de *ku* et *kf* utilisées pour chaque situation de couplage et pour chaque éolienne.

Carte pleine page: le cheminement des câbles et tous les objets utilisés sont présentés sur la carte choisie.

10.4. ANNEXE. Theory behind the calculations

Medium voltage distribution grids, to which most of the decentralized power supply structures are connected, have nominal voltages of 20 or 30 kV in accordance to DIN IEC 38. In order to have a high reliability of power supply, medium voltage grids are normally built up as ring grids, ring grids with cross connections or meshed grids. Under normal conditions, often they are operated as radial networks. In the case of repair and/or disturbance, individual parts of the grid can be switched off or switched over by existing grid interfaces.

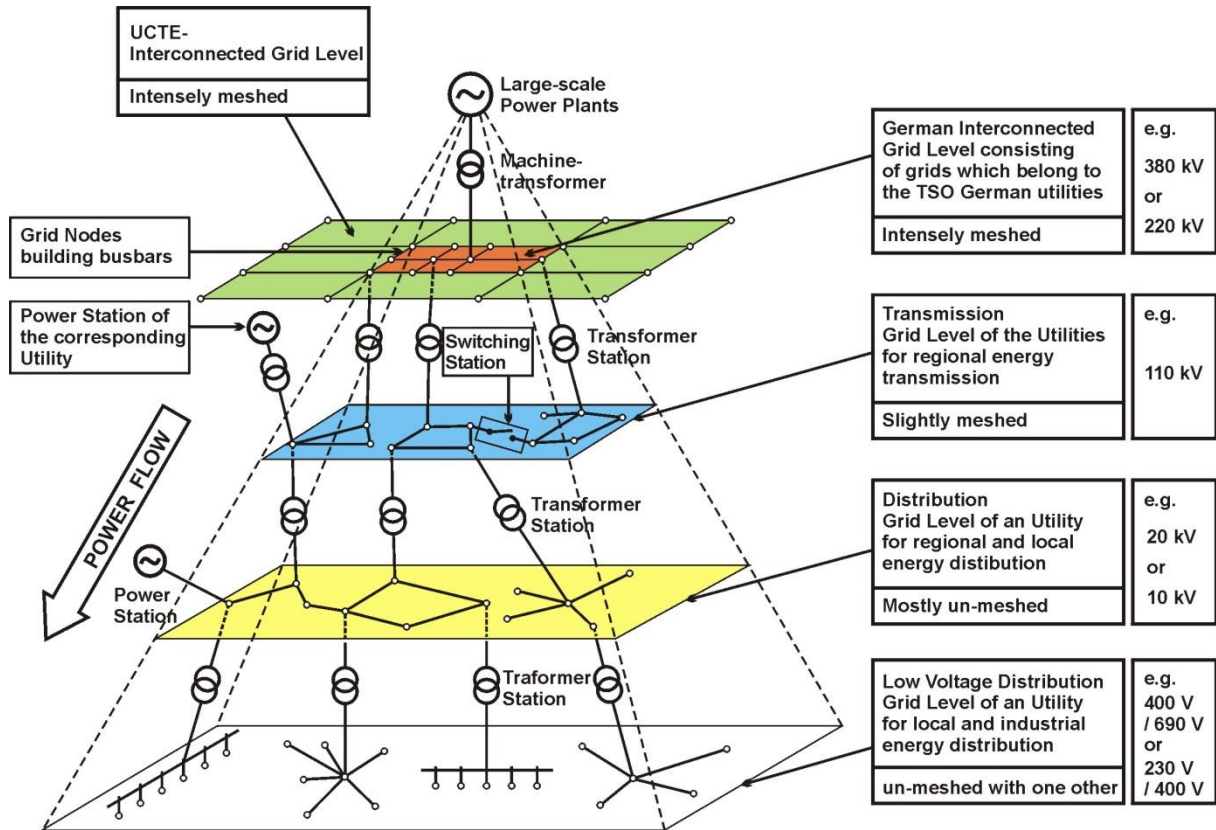


Figure 42: Different voltage levels and grid structures of the electrical grid in Germany

Usually, also a wind park has a radial grid, because one or more wind turbine generators are connected to one grid node. Due to this, the calculation algorithm was adapted to this grid configuration (radial grid). Meshed grids will not be calculated.

10.4.0 eGRID – Component Modeling

In order to simplify the electrical grid input, only components which are primarily important for the electrical grid calculation are implemented. Ancillary equipment like protection devices is not implemented. The components, relevant for the grid calculation, are:

- External Grid
- Transformers
- Electrical Grid (Cables / Overhead Lines)
- Busbars
- Loads / Compensation Devices
- WTGs

10.4.0.0 External Grid

Differently to other grid calculation programs, in the load-flow calculation the External Grid is implemented as an RX-serial connection – in the same manner as in the short-circuit calculation. Thus, this component also contains power losses and a voltage drop. This has the advantage that the voltage at the grid connection point (input voltage of the External Grid) is not constant every time. It can rise or fall in the case that there is no regulation about the connection point of this component.

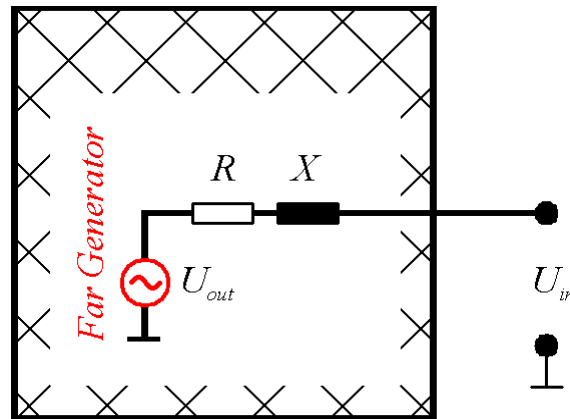


Figure 43: Circuit diagram of the 'External Grid' component

Certainly, this approach can be confusing for utilities which have all-embracing grid models. But, – normally – a non involved person gets only the characteristics (S_K'' , Ψ_K and the rated voltage U_R) of a possible connection point. The voltage of this grid node must not be constant in practice, in opposite to e.g. a large transformer station at which the voltage is regulated.

At the end of the total load-flow calculation, all angles are modified based on the angle of the output voltage of the 'External Grid' element – the Far Generator - which is set to '0'.

10.4.0.1 Two-Winding-Transformers

A Two-winding-transformer is integrated by its equivalent T-circuit diagram. Therefore, the impedance of a transformer has to be split into two equal portions.

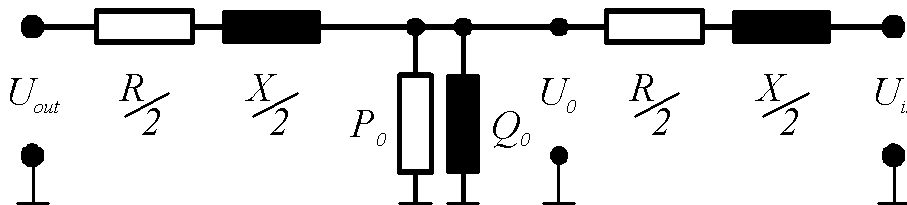


Figure 44: Circuit diagram of a two-winding-transformer

All calculations are performed at the high voltage level. So, there must be a voltage conversion from the lower- to the higher voltage level of the transformer. Due to the fact, that – depending on the polarity of the transformer – this conversion has to be done at the input or output side of the transformer using the transformation factor, the transformation is not pictured in the circuit diagram.

10.4.0.2 Electrical Grid

In the medium voltage level, the cross sections of the overhead lines and cables lie in a limited range, which is determined by the mechanical and electrical characteristics of the lines. The maximally permissible cross section of overhead lines is limited by the mechanical stability of the supporting masts of the overhead line and may not exceed 120 mm² [12, 13]. The minimum cross section does not amount less than 16 mm² in consideration of the permissible mechanical wire stresses [12]. However, in practice no cross sections for overhead lines and cables under 35 mm² are used due to economic reasons.

For the simulation of the cables or overhead lines, the equivalent Π -circuit diagram is used in the calculation algorithm.

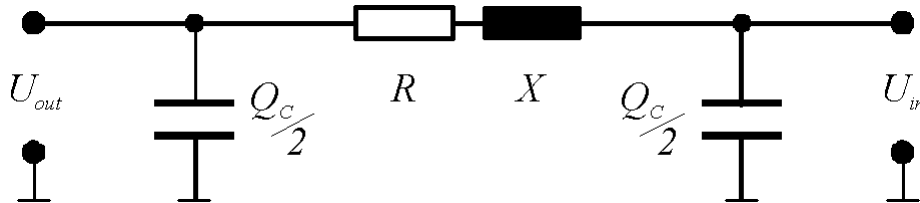


Figure 45 Circuit diagram of a cable or overhead line

While the voltages are calculated in the same manner as by the External Grid, by the calculation of the power values the reactive power production of the capacities have to be considered.

10.4.0.3 Loads / Compensation Devices

The loads are regarded as passive grid elements with an active power demand.

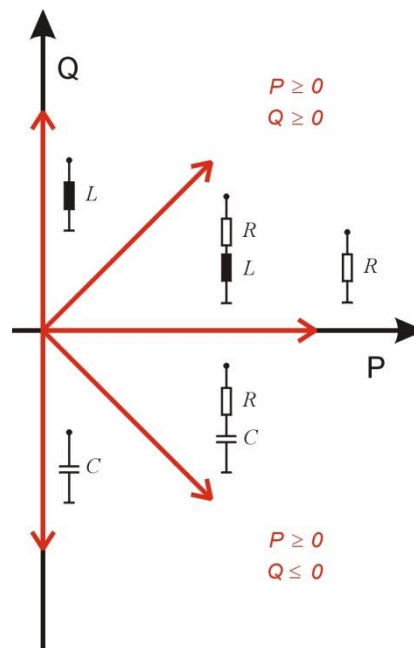


Figure 46: Different load classes

Normally, the power demand of the loads depends on the actual voltages. This dependency is not linear. The accuracy of the mathematical description of this relationship, the so called load-characteristics, mainly defines the calculation accuracy of all parameters of the operating condition of the grid like the voltages of the nodes, power losses and voltage drops. In practice, the consumer characteristics are very various. So, assumptions are inevitable. The literature [7, 8, 9] gives some theoretical recommendations, which are only conditionally applicable in practice. The available programs solve this problem differently. Each program developer uses his own “tricks” in order to reach a solution (convergence) of the mathematical grid model.

In the educational books as well as in the available grid calculation programs, the power dependency (active and reactive power) referenced to the actual voltages is integrated via a power function. The value of the exponent varies among the different sources from ‘2’ down to ‘0’.

$$P = P_R \cdot \left(\frac{U}{U_R} \right)^n ; \quad Q = Q_R \cdot \left(\frac{U}{U_R} \right)^m$$

The dependency is pictured in the following figure for several exponents.

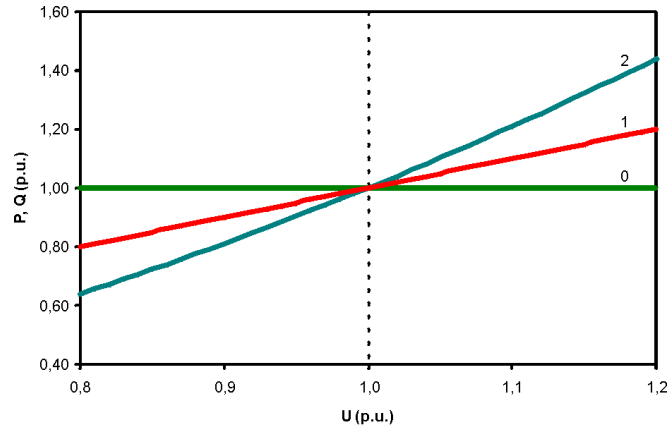


Figure 47 Common load characteristic

This description of the dependency has the advantage that – if the grid calculation leads to no result (does not converge) – the convergence of the calculation can be forced by changing the exponent towards '0'. Unfortunately the user is not informed about this adjustment.

In our calculation algorithm, this dependency is integrated via the average load characteristics based on [10, 11],

$$P = P_R \cdot \left(K_{0P} + K_{1P} \cdot \left(\frac{U}{U_R} \right) + K_{2P} \cdot \left(\frac{U}{U_R} \right)^2 \right); \quad Q = Q_R \cdot \left(K_{0Q} + K_{1Q} \cdot \left(\frac{U}{U_R} \right) + K_{2Q} \cdot \left(\frac{U}{U_R} \right)^2 \right)$$

which correspond to the load conditions within the medium voltage level at best in our experience. On the basis of the parameters K_{0P} , K_{1P} , K_{2P} , K_{0Q} , K_{1Q} , K_{2Q} , it is possible to adapt the characteristics to the real load conditions without a larger expenditure. A variation of these characteristics, which are represented in Figure 47 with realistic values ($K_{0P} = 0.83$; $K_{1P} = -0.3$; $K_{2P} = 0.47$; $K_{0Q} = 4.9$; $K_{1Q} = -10.1$; $K_{2Q} = 6.2$), does not take place in the calculation program. However, the user is informed in the case that the calculation did not converge.

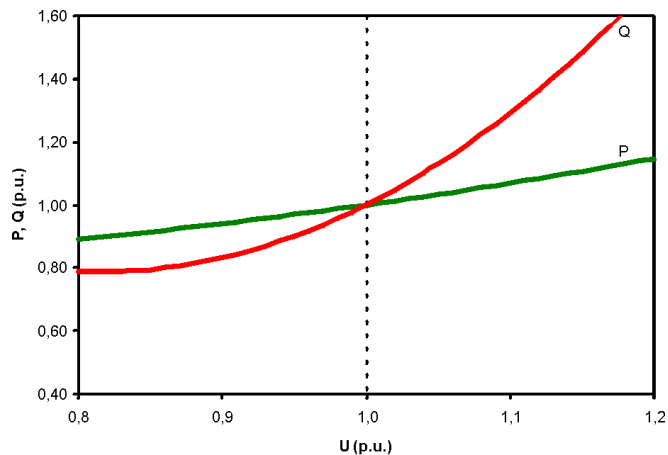


Figure 48: Average load characteristic based on [10, 11]

10.4.0.4 Generators / Wind Turbine Generators

All generators – including wind turbine generators – which are available on the market can be divided into four main classes:

- Synchronous generators
- Induction generators
- Double-fed induction generators
- Generators which are connected to the grid via a power electronic converter, so that the generator itself is not important for the behavior of the total generator system any more.

Each of them can be specified by similar parameters in static operation. Hereby, it is assessed that the feed-in power does not depend on the actual voltage at the connection node of the generator.

It is obvious, that the feed-in power of wind turbine generators depends on the wind speed. The dependency between wind speed and the active power output was already implemented in WindPRO for many marketable wind turbines.

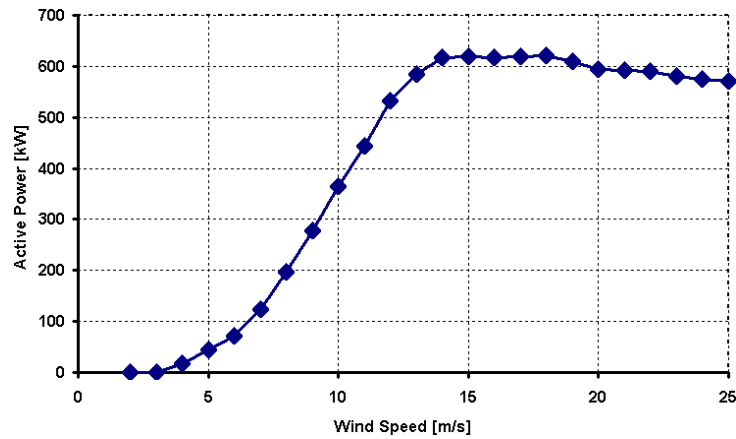


Figure 49 Dependency between wind speed and active output power by a Nordex 43 wind turbine [5]

Regarding the reactive power, the relationship between the active power and the power factor, which is not constant, had to be included in the dataset. Actually the calculation of the reactive power is performed by linear interpolation on the basis on few sampling points, which are taken out of measurement reports, made by international acting measurement institutes.

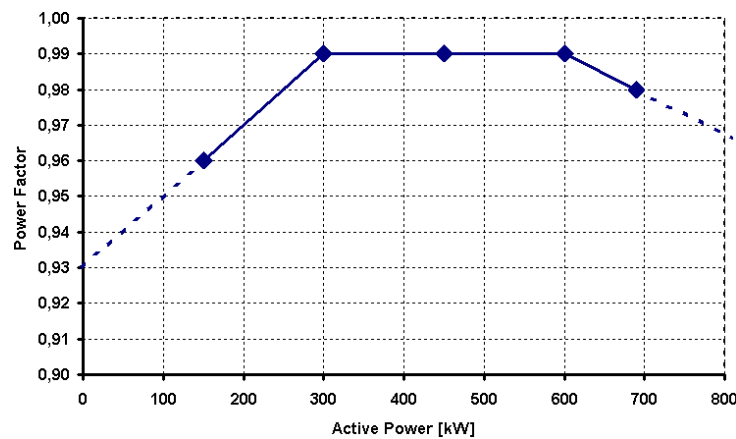


Figure 50: Implemented power factor characteristic of a Nordex 43 wind turbine [4]

Due to the way, that the calculation of the power factor via few sampling points contains a loss of accuracy, this calculation has to be replaced by another algorithm. But the fact, that for a normal user there are many unknown parameter settings in a wind turbine which have directly effects to the power factor, like the switching points of compensation capacities, an exact characterization seems to be impossible.

10.4.1 eGRID – Calculation Methods

The purpose and the scale of grid calculations are determined by a concrete and individual task, which can be very different in each case. For example, the existing connection capacity has to be evaluated in order to decide about the connection of a further wind turbine generator to the grid, which is described via technical criteria. In accordance with the guidelines for parallel operation of own generation plants with the grid of the utility [2, 3], these criteria refer with:

- Voltage variations also by flickers
- Variations of the short-circuit current
- Power factors
- Harmonics

These criteria can be affected by the normal operation of a wind turbine generator. Using modern wind turbines, in which IGBT inverter technology is implemented, the last two items can be neglected. Thus, the first two criteria represent the characteristics, which are to be considered as the main topics for the grid calculation.

The grid, at which the connection of wind turbine generators is to be examined, is regarded as an energy distribution system with two areas: the infinite bus and the affected grid area, as presented in the following picture.

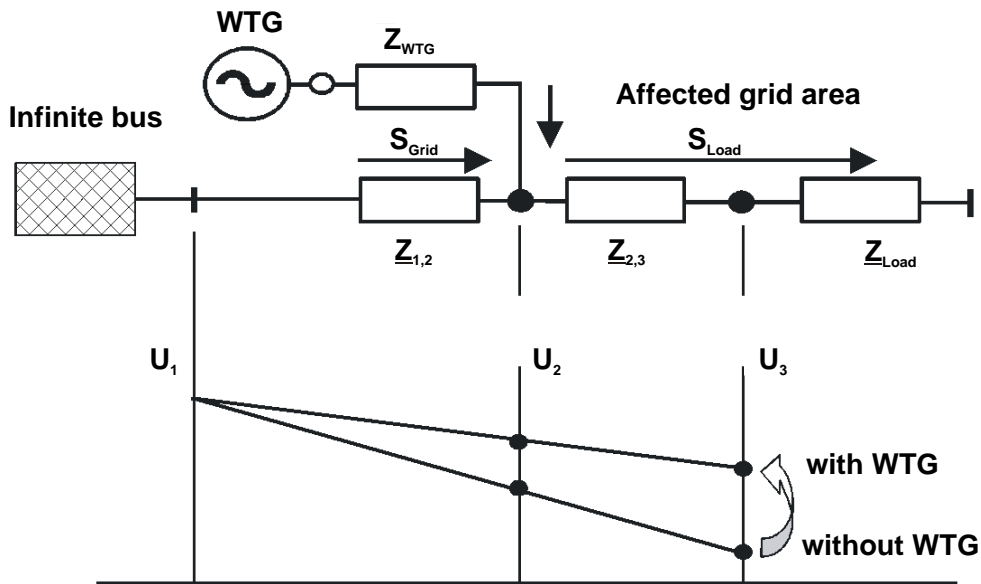


Figure 51: Typical example of a wind turbine connection to the grid

Due to the problem definition specified above, only two calculations are selected from the large scale of the grid calculation tasks: the load-flow calculation and the short-circuit calculation. The voltages of the grid nodes could be obtained by load-flow calculations. So, on the basis of two calculations (calculation with/without wind turbine generators), voltage variations can be determined. The short-circuit calculation specifies the available short-circuit power of a grid node, which can be used for the estimation of flicker effects.

As already mentioned, the electrical calculation implements two independent calculations: the load-flow and short-circuit calculation. Differently to other calculation programs, which have to handle large matrices in order to calculate a meshed grid, due to the concentration on radial grids, the calculation algorithm of the eGRID module bases on recursion, a very powerful calculation method. Doing so, several simplifications or neglections, necessary to handle large matrices can be avoided.

10.4.1.0 Load-Flow Calculation / Calculation of Voltage Variations

The voltages of the grid nodes are worked out by the load-flow calculation. This happens by setting the individual nominal voltage value for each grid node in a first calculation step. On the basis of the active and reactive power of the generators and loads, which are known due to the voltage set before, now the power losses in the components are calculated. The calculation is made through the entire grid toward the 'External Grid' component, by which it is presumed that it can absorb or provide any power rates. On the basis of the – in such a way determined – load-flow, a specifying of the voltages takes place in a next step. Based on a fixed voltage of one grid node, given by the user, the voltages of all grid nodes are calculated again.

Due to these new voltages and an eventually voltage dependency of the loads, a new calculation of the load-flow can be necessary (next iteration step). After calculating the power values, new voltage values are calculated again and so on.

This calculation (iteration) is broken off, if the difference between two calculation steps achieves the given calculation accuracy. In [14] it is shown that under the multiplicity of all possible abort criteria the active power difference represents a reliable criterion.

$$\max(\text{abs}(P_i - P_{i+1})) < \varepsilon$$

The calculation accuracy can be given by the user. The default value is 1e-6 kW. However, a fundamental characteristic of the iteration calculation is that the calculation leads to no result, i.e. that it does not converge. Therefore, a maximum number of iteration steps is specified, which can be also set by the user. Here, the default value is 50.

Due to the calculation of a single load-flow calculation it is necessary to regulate the voltage in a specified grid node, i.e. there has to be a specified voltage in a specified node. So, the parameters for a single load-flow calculation are

- the grid node for which the voltage is given
- the voltage of that node

Also it is possible, that there is no voltage regulation within the examined grid, this means the regulation is implemented within the Far Generator. In this case, the internal voltage of the 'External Grid' is kept on the specified voltage (see also chapter 10.4.0).

The calculation of the voltage variations includes two load-flow calculations, the calculation of the grid e.g.

- without generators and
- with generators.

Thereby, a grid node can be assigned, at which no voltage variation takes place, i.e. the voltage is constant. So, for the calculation of voltage variations, there must be another parameter:

- the grid node for which the voltage is constant.

Naturally, this can be the same node with the given voltage value.

10.4.1.1 Short-Circuit Calculation

In all practical cases it is possible to determine the short circuit current at fault location via the method of the equivalent voltage source at the short-circuit location. During the short-circuit calculation, this source is the only existing voltage source within the grid [15, 16].

In principle, the calculation of the currents during a short circuit is a calculation of transient processes which requires the solution of differential equations. However, in practice frequently only a quasi-stationary calculation of the sub-transient current I_K'' and the sub-transient short-circuit power S_K'' is performed.

The computation is based on the determination of the impedance of the entire grid related to the fault location. Hereby, all components which feed-in into the grid i.e. the 'External Grid' and all types of generators are replaced by their internal impedance's. Further, the capacities of the cables and overhead-lines, the parallel admittance's of the no-rotating loads, the impact by the static loads, the tap position and the no-load losses of the transformers can be neglected. So, the 'External Grid', the cable and overhead-lines, the transformers as well as the generators are only described by their individual R-X serial impedance, whereas loads are ignored.

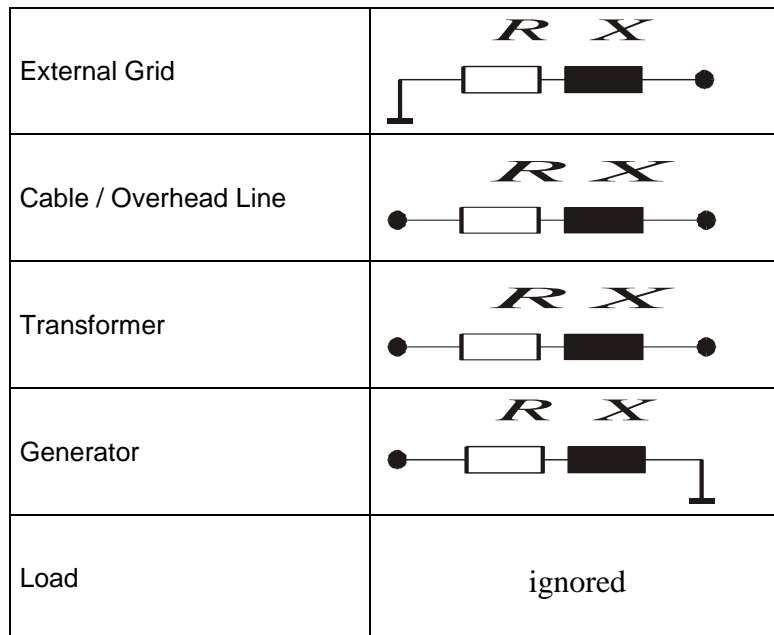


Figure 52: Equivalent short-circuit diagrams

Normally the short-circuit currents and the short-circuit power are determined for all grid nodes. Hereby, in each case only one fault location is chosen and analyzed.

Concerning the tasks of the project it is necessary to calculate only the symmetrical short-circuit in all grid nodes.

10.4.1.2 Flicker calculation

The flicker calculation bases on the results of the short-circuit calculation. Hereby, the short-circuit power and the grid angle of an inspected grid node is used, calculated by a short-circuit calculation without generators.

Basics

Based on the calculation algorithm of different wind turbines in the grid, the flicker contribution of each wind turbine can be estimated by the equation

$$P_{lt\ WT} = 1.1 \cdot \frac{c \cdot S_{R\ WT}}{S_k''} = \frac{c \cdot P_{R\ WT}}{\lambda_{R\ WT} \cdot S_k}$$

concerning the medium voltage level.

Hereby, the phase angles of the wind turbine and of the grid impedance are assumed as worst case. Within this formula, factor c is the flicker factor of the wind turbine, normally given by the manufacturer. $S_{R, WT}$ represents the rated apparent power of the wind turbine and S_k'' is the initial short-circuit power of one grid node, a single wind turbine affects to.

Normally, the inspected grid node is the point of common coupling (PCC), the connection node of a whole wind farm, due to the fact that this node is affected most of all. Relating the grid nodes within a single wind farm or by the calculation of a grid with several wind farms (several PCC), different calculation algorithms exist in order to calculate the resulting flicker values in these nodes. The implemented algorithm bases on a publication of DEWI (Deutsches Windenergie-Institut GmbH).

In this algorithm, it is possible that the initial short circuit power of a grid node has to be taken into account in order to calculate the flicker contribution of one wind turbine, although this node is neither the grid node, at which the turbine is connected, nor the node, for which the long term flicker is being calculated. The allocation of the node will not be presented within this manual.

The interaction of each single flicker value to the total flicker is described by the equation

$$P_{lt\ res} = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^n P_{lt\ WTi}^m}$$

whereas factor n represents the number of wind turbines and factor m represents an interaction factor normally set to 2. If all wind turbines are of the same type, i.e. they have the same apparent power and the same c -value, the combination of these equations leads to the popular formula for the flicker calculation concerning the PCC node or superordinated grid nodes.

$$P_{lt\ res} = 1.1 \cdot \frac{\sqrt{n} \cdot c \cdot S_{R\ WT}}{S_k''}$$

In case of additional flicker sources in the grid, basing on different energy sources like wind or water, the factor m can be set up to 3, which corresponds to

$$P_{lt\ res} = 1.1 \cdot \frac{\sqrt[3]{n} \cdot c \cdot S_{R\ WT}}{S_k''}$$

As already mentioned, within the equations above the phase angles of the wind turbine and of the grid impedance are assumed as worst case. For an exact flicker calculation, the angles have to be considered using a second flicker factor, the flicker relevant phase angle.

$$c_{exact} = c_{worst\ case} \cdot \left| \cos(\Psi_k + \varphi_f) \right|$$

Due to several reasons, which should not be represented within this manual, the term $\cos(\Psi_k + \varphi_f)$ cannot be '0'. If the value is lower than '0.1', the result of this term is set to '0.1'.

Different methods providing flicker data

Due to the fact, that there are three different ways to present the relevant flicker data of a wind turbine, the implementation of the flicker calculation has to consider these methods.

Method A: Flicker factor and the individual flicker relevant phase angle

Here, the provided data are the flicker factor and the individual flicker relevant phase angle. The contribution of one wind turbine to the total long term flicker is being calculated via the equations described before.

Method B: Flicker factor and a dependent flicker relevant phase angle ($\varphi_f = -\Psi_k$)

The available data are the flicker factor and the flicker relevant phase angle $\varphi_f = -\Psi_k$, e. g. by an Enercon E40 (500 kW).

Ψ_k	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
c	6	6	6	6	6	6	6

Table 1 Flicker data of an E40 (500 kW)

Using this phase angle – due to the fact that the cos-term always is set to ‘1.0’ – for the flicker contribution of the wind turbine always the worst case is considered.

Method C: Various flicker factors subjected to the grid angle Ψ_k

Here, the provided data are various flicker factors subjected to the grid angle Ψ_k , e. g. an AN Bonus 1.3 MW.

Ψ_k	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
c	14	12	10	7	3	3	6

Table 2 Flicker data of an AN-Bonus 1.3 MW

Due to the fact that the calculation of the long term flicker requires the flicker factors of all grid angles, interim values are calculated using linear interpolation.

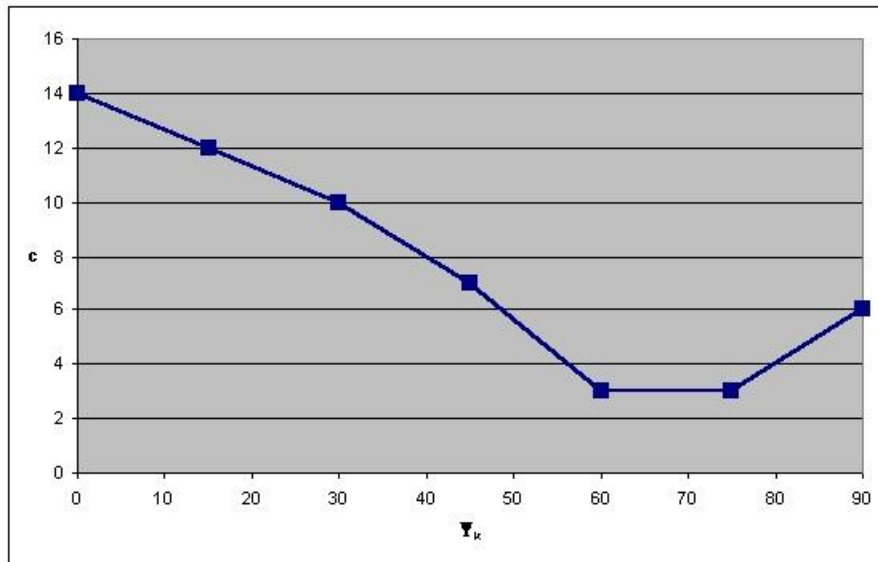


Figure 53 Interpolation of the AN-Bonus data

If the flicker data should not be given within the range of 0°-90°, e. g. a turbine by Vergnet (300 kW),

Ψ_k	30°	50°	70°	85°
c	12.6	11.4	9.0	6.3

Table 3 Flicker data of a Vergnet turbine (300 kW)

the values at the border areas are calculated again by linear interpolation, using two adjacent values.

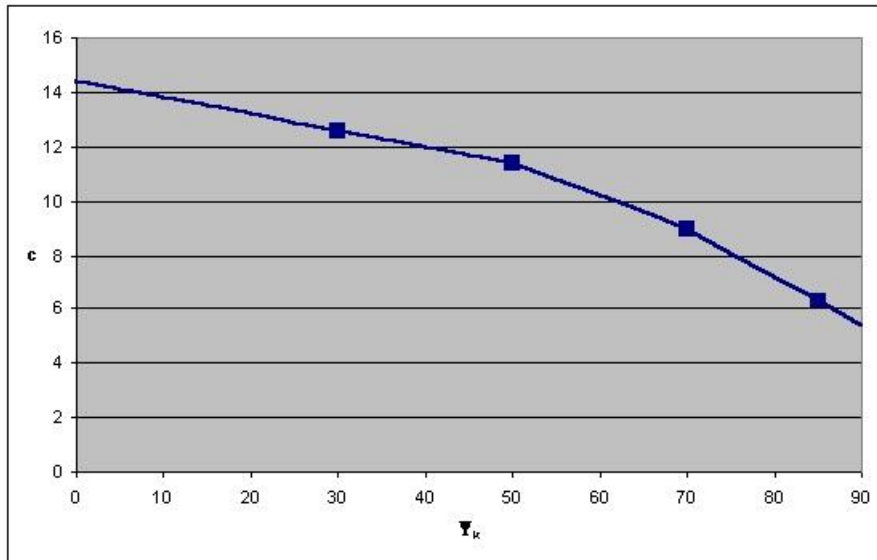


Figure 54 Interpolation of the Vergnet data

Due to the fact, that the angles at such border areas are not realistic anyway, for those areas a major tolerance to the real value seems to be acceptable.

10.4.1.3 Voltage Variations due to Switching Effects

Concerning the medium voltage level, the height of the voltage variations due to switching effects of each wind turbine can be calculated by the equation

$$\Delta U_{max} = 1.1 \cdot \frac{k_{i,max} \cdot S_{R,WT}}{S_k} = \frac{k_{i,max} \cdot P_{R,WT}}{\lambda_R \cdot S_k}$$

The calculation process is very similar to the flicker calculation. Here, factor $k_{i,max}$ represents the maximum contribution of one wind turbine. Again, the height of this contribution depends on the grid angle. Equal to the flicker calculation, factor $k_{i,max}$ can be replaced by a factor $k_{i,\psi}$ which represents the contribution at the specified grid angle Ψ_k .

Normally, the $k_{i,\psi}$ values are given as a table incrementing in 5°-steps.

Ψ _k	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90
k _{i,ψ}	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0

Table 4 Switching factors of an AN-Bonus 1.3 MW ($k_{i,max} = 1.2$)

Again, interim values are calculated using linear interpolation.

10.4.1.4 Interaction of the flicker contributions of switching processes

Based on the IEC Guideline as well as the actual BDEW Guideline (Germany), the long term flicker which is being created by a switching process of a WTG has to be calculated using:

$$P_{lt,E} = 8 \cdot N_{120,i}^{0,31} \cdot k_{f,i(\psi)} \cdot \frac{S_{rE}}{S_{KV}} = \frac{8}{S_{KV}} \cdot N_{120,i}^{0,31} \cdot k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE}$$

Due to the fact that there shouldn't be a difference whether a single turbine has e. g. 30 switching processes in a time frame of two hours (N_{120}) or each turbine of a group of ten WTGs switches only three times in the same time frame, a grouping is being performed within WindPRO: same type of WTG, same apparent power value S_{rE} , same value for the 'Flicker Step Factor' k_f and same grid connection point respectively short-circuit power value of the grid connection point S_{KV} (this node can be different based on the inspected grid node). The total flicker contribution effect of the grouped WTGs is being calculated using:

$$P_{lt,E} = 8 \cdot (n \cdot N_{120,i})^{0,31} \cdot k_{f,i(\psi)} \cdot \frac{S_{rE}}{S_{KV}}$$

Here, factor n is the number of the grouped turbines.

Unfortunately there isn't a calculation instruction in the IEC guideline or the old German guideline how to calculate the total flicker contribution based on an interaction of the contributions of different turbines or same kind of turbines with different grid connection points. Thus, so far (incl. WindPRO 2.6) a quadratic interaction factor has been used in WindPRO:

$$P_{lt} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_E} P_{lt,i}^2}$$

Now, there is a calculation instruction in the German BDEW guideline:

$$P_{lt} = \frac{8}{S_{KV}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_E} N_{120,i} \cdot (k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE})^{3,2} \right)^{0,31}$$

Regrettably this equation only relates to the grid connection point of a whole wind farm because there is only one short-circuit power of a single grid node which is being assessed for all turbines to calculate their contribution. In order to get a general equation the equation has to be modified.

$$\begin{aligned} P_{lt} &= \frac{8}{S_{KV}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_E} N_{120,i} \cdot (k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE})^{3,2} \right)^{0,31} \\ &= \frac{8^{0,31}}{S_{KV}^{0,31}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_E} N_{120,i}^{0,31} \cdot (k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE})^{3,2 \cdot 0,31} \right)^{0,31} \quad ; \quad 3,2 \cdot 0,31 = 0,992 \approx 1 \\ &= \left(\sum_{i=1}^{N_E} \frac{8^{\frac{1}{0,31}}}{S_{KV}^{\frac{1}{0,31}}} \cdot N_{120,i}^{0,31} \cdot (k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE})^{\frac{1}{0,31}} \right)^{0,31} \\ &= \left(\sum_{i=1}^{N_E} \left(\frac{8}{S_{KV}} \cdot N_{120,i}^{0,31} \cdot k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE} \right)^{\frac{1}{0,31}} \right)^{0,31} \end{aligned}$$

Using

$$P_{lt,E} = \frac{8}{S_{KV}} \cdot N_{120,i}^{0,31} \cdot k_{f,i(\psi)} \cdot S_{rE}$$

result to

$$P_{lt} = \left(\sum_{i=1}^{N_E} P_{lt,i}^{\frac{1}{0,31}} \right)^{0,31}$$

or in another way of writing:

$$P_{lt} = \sqrt[0,31]{\sum_{i=1}^{N_E} P_{lt,i}^{\frac{1}{0,31}}}$$

Thus, the same equation like before can be used in case an interaction factor of

$$\frac{1}{0,31} = 3,2258$$

is being taken into account.

10.5. Références:

- Diedrichs, Volker: Kleinkraftwerke in Verteilungsnetzen: Mittelzeitsimulation mit einer Power Systems Library in MATLAB/SIMULINK, DEWEK '98 Tagungsband, Wilhelmshaven, 1998
- VDEW: Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz - Richtlinie für Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, 2. Ausgabe, VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 1998, ISBN 3-8022-0584-7
- VDEW: Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Richtlinie für Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, 4. Auflage, VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 2001, ISBN 3-8022-0646-0
- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE): Marktübersicht Windenergie 2002, Osnabrück, 2002
- Energi- og Miljødata (EMD): WTG Catalogue of WindPRO, Version 2.4, May 2004
- Kaufmann, Wolfgang: Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme, Frankfurt am Main: VWEW-Verlag; Berlin: VDE-Verlag; 1995, ISBN 3-8022-0469-7 (VWEW), ISBN 3-8007-2141-4 (VDE-Verlag)
- Fritz Schultheiß, Klaus-Dieter Weißnigk: Berechnung elektrischer Energieversorgungs-netze, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1971
- Hans Happoldt, Dietrich Oeding: Elektrische Kraftwerke und Netze, 5. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978, ISBN 3-540-08305-7
- Gerhard Hosemann, Wolfram Boeck: Grundlagen der elektrischen Energietechnik, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1983, ISBN 3-540-11787-3
- N. Buslowa, W. Winoslaswsky, G. Denisenko, W. Perchatsch: Elektrische Systeme und Netze, Hochschulverlag, Kiev, 1986
- W. Wenikow: Berechnung und Analyse der Arbeitsverhältnisse von Netzen, Energie-Verlag, Moskau, 1974
- Peter Niemeyer: Freileitung - Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze Band 3, Frankfurt am Main: VWEW-Verlag; Berlin: VDE-Verlag 1992; ISBN 3-8022-0339-9 (VWEW), ISBN 3-8007-1863-4 (VDE-Verlag)
- VDEW: Kabelhandbuch, 5. Auflage, VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 1997, ISBN 3-8022-0455-7
- Edmund Handschin: Elektrische Energieübertragungssysteme, 2. Auflage, Heidelberg Hüthig Verlag, 1987
- Friedrich W. Kloeppe, Hans Fiedler: Kurzschluß in Elektroenergiesystemen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1969
- DIGSILENT GmbH: Technical Reference DIGSILENT Powerfactory Version 12.1, Gomaringen, 2001
- HÜTTE Taschenbücher der Technik: Elektrische Energietechnik Band 3 Netze, 29. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1988, ISBN 3-540-15359-4
- ABB Calor Emag Taschenbuch: Schaltanlagen, 10. neubearbeitete Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin, 1999, ISBN 3-464-48235-9
- Rainer Klosse, Fritz Santjer, Gerhard J. Gerdes: Flicker assessment at Wind Turbines, DEWI Magazin Nr. 11, Wilhelmshaven, 1997

