# Etude d’un projet de parc éolien

## Contexte

La société Meunot a été embauché par une grande entreprise de sécurité pour implanter un parc éolien afin de consommer une énergie plus durable.

## Introduction

La production électrique créée à partir d’éoliennes (également appelées aérogénérateurs) fait l’objet d’importants développements industriels.

Les sites d’installation sont choisis en fonction de plusieurs paramètres : la gestion technique de la production sur le réseau électrique (raccordement), les impacts environnementaux (oiseaux, paysage, bruit, etc.), l’aménagement du territoire.

Il existe deux types de sites comme l’illustrent les deux photos ci-dessous :

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Terrestre** | **Maritime** |

Les diagrammes de contexte et des cas d’utilisation, ci-dessous, décrivent le rôle et les missions de la société Meunot, société chargée d’exploitation du projet.

## Étude de l’implantation des éoliennes dans le parc

Le site a été choisi et validé par les autorités. Le chargé d’exploitation doit maintenant implanter les dix aérogénérateurs d’une puissance nominale de 2 MW sur les parcelles choisies. Le raccordement des éoliennes entre-elles se fait par des câbles en cuivre de forte section dont le coût est très important.

|  |  |
| --- | --- |
| Question 1.1 | **Expliquer** le problème rencontré lorsque les aérogénérateurs sont alignés par rapport au vent. |
| DT1 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 1.2 | Sur la vue ci-dessous, **barrer** la flèche représentant la direction la plus mauvaise du vent dominant par rapport à l’implantation et **entourer** la flèche représentant la direction optimale du vent dominant par rapport à l’implantation du parc éolien. |
| DT1 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 1.3 | En tenant compte du schéma d’implantation DT2, **calculer** le coût minimal et maximal de raccordement des éoliennes, sachant que le coût du câble est de 100 000 € au km. |
| DT2 |
| Réponse |  |

## Étude de la stabilité de l’éolienne au regard de l’effet de poinçonnage

La résistance du sol ne doit pas être dépassée. Les caractéristiques du sol sous la fondation de l’éolienne sont les suivantes : sol cohérent, moyennement consistant et craie tendre.

Il s’agit maintenant de vérifier la stabilité de la structure au regard des effets de poinçonnage (enfoncement dans le sol).

|  |  |
| --- | --- |
| Question 2.1 | **Déterminer** la masse de l’ensemble {nacelle, mât, pales}.  **Déterminer** le volume des fondations.  **Calculer** la masse en y ajoutant celle due à la surcharge de ferraillage. |
| DT3 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 2.2 | **Calculer** le poids total de l’aérogénérateur.  On prendra g = 10 m∙s-2. |
|  |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 2.3 | **Donner** le type de sollicitation que va générer l’aérogénérateur sur le sol. |
|  |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 2.4 | **Calculer** la pression p1 (en N∙m-2) s’exerçant sur le sol. |
|  |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 2.5 | **Tracer**, sans échelle sur la figure ci-dessous, le profil de pression qui va s’y appliquer. |
|  |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 2.5 | **Tracer**, sans échelle sur la figure ci-dessous, le profil de pression qui va s’y appliquer. |
|  |
| Réponse | Une image contenant texte, horloge, périphérique, jauge  Description générée automatiquement |

## Étude de la stabilité de l’éolienne au regard de l’effet de déversement

Il s’agit maintenant de vérifier la stabilité de la structure au regard des effets de déversement (basculement de l’éolienne).

Les efforts aérodynamiques du vent sur les pales créent sur la nacelle un effort horizontal **Frotot** = 250 kN. La résultante s’applique à une hauteur h1 = 97 m**.**

Il y a également un effort horizontal sur le mât de l’éolienne **Fmât** = 30 kN, dont la résultante des efforts sur le mât s’applique à une hauteur h2 = 65 m.

|  |  |
| --- | --- |
| Question 3.1 | Le résultat de simulation (disponible DT4) représente la répartition des pressions sous la fondation dans les conditions de chargement fixées ci-dessus. **Déterminer** la valeur maximale de pression p2. |
| DT4 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 3.2 | **Entourer** ci-dessous le profil correspondant à cette simulation**.** |
| DT4 |
| Réponse |  |

## Conclusion sur la stabilité de la structure

|  |  |
| --- | --- |
| Question 4.1 | Les sollicitations de poinçonnage et de déversement se superposant, en **déduire** la valeur de la pression maximale pmax qui s’exerce sur le sol. |
|  |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 4.2 | La résistance du sol est comprise entre 0,2 et 0,4 MPa. Sachant que le bureau d’étude de WindPicardie a estimé qu’un coefficient de sécurité de 1,5 minimum est nécessaire, **vérifier** que le cahier des charges sur cette contrainte de non-enfoncement est respecté. |
|  |
| Réponse |  |

## Prise en compte du phénomène de résonance

Si on fournit à un système de l’énergie régulièrement, à une fréquence égale à sa fréquence propre, des oscillations d’amplitude croissante vont apparaître : c’est la résonance.

Le DT5 permet de mettre en évidence ce phénomène.

|  |  |
| --- | --- |
| Question 5.1 | **Commenter** le comportement du mât et **décrire** le problème qui pourrait apparaître. |
| DT5 |
| Réponse |  |

La fréquence d’excitation dépend notamment de la vitesse de rotation du rotor (ensemble tournant).

|  |  |
| --- | --- |
| Question 5.2 | **Calculer** la fréquence frotor pour une vitesse maximale de rotation de 25 tours par minute. |
|  |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 5.3 | À l’aide du DT6, **déterminer**, en justifiant votre réponse, s’il y a un risque que l’éolienne entre en résonance sur la plage de fonctionnement allant de 0 à 25 tr∙min-1. |
| DT6 |
| Réponse |  |

## Optimisation de la production d’un aérogénérateur

Une image contenant texte, périphérique

Description générée automatiquementL’objectif de cette partie est d’analyser le comportement d’une éolienne afin d’optimiser sa production d’énergie électrique.

Le système de contrôle – commande est un dispositif qui surveille l’état de l’éolienne en permanence. Il communique avec le centre de conduite ou l'opérateur de maintenance en transmettant des alarmes ou des demandes d'entretien. Il peut aussi recueillir des statistiques et contrôler sa position actuelle.

Il permet également de contrôler de manière continue le dispositif d’orientation de la nacelle de l’éolienne (Yaw) ainsi que le dispositif de calage des pales (Pitch).

Une modélisation multi-physique (voir DT7) permet de simuler le comportement de l’aérogénérateur dans des conditions extrêmes sans avoir à le tester en grandeur nature.

Le module de supervision de cette modélisation simule le comportement du système de « contrôle – commande » et permet de contrôler l’éolienne en fonction de différents paramètres, qu’ils soient internes ou externes.

|  |  |
| --- | --- |
| Question 6.1 | D’après le diagramme DT8, **donner** les exigences permettant de réaliser l’exigence *« Optimiser la production en fonction du vent »*. |
| DT8 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 6.2 | À partir de la modélisation du DT7, **déterminer** les variables d’entrée et de sortie de la supervision. |
| DT7 |
| Réponse |  |

## Limitation de la vitesse de rotation du rotor

On donne les courbes de puissance et du coefficient de puissance Cp de l’éolienne.

P

Cp

|  |  |
| --- | --- |
| Question 7.1 | A partir du DT9, **déterminer** les conditions de vent limite de production d’énergie Vvent\_mini et Vvent\_maxi ainsi que la vitesse nominale Vnom à partir de laquelle celle-ci fournit sa puissance maximale. |
| DT9 |
| Réponse |  |

La fréquence de rotation du rotor est limitée par la fréquence de rotation du générateur qui dépend de la fréquence du réseau électrique.

Le DT10 présente le principe de protection de survitesse du générateur. Celui-ci permet de déterminer les vitesses de déclenchement de cette protection mais aussi la fréquence de rotation critique du générateur.

|  |  |
| --- | --- |
| Question 7.2 | Le multiplicateur a un rapport de transmission de 112,8. **Déterminer** les fréquences de rotation maximale et nominale du rotor de l’éolienne. |
| DT10 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 7.3 | **Justifier** la nécessité de réguler la vitesse du rotor et **expliquer** quel système permet cette régulation. |
| DT10 |
| Réponse |  |

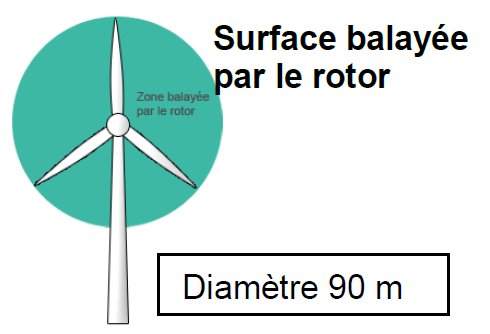
## Domaine de fonctionnement

La machine à états du modèle multi-physique permet de décrire les différents états de fonctionnement de l’éolienne grâce au diagramme d’état.

|  |  |
| --- | --- |
| Question 8.1 | À partir de la description des différentes phases de fonctionnement d’une éolienne, **compléter** les transitions manquantes entre chacun des états du diagramme d’état ci-dessous. |
| DT9 |
| Réponse |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 8.2 | Sur le graphique ci-dessous, **identifier** les zones correspondant aux états :  - éolienne parquée ;  - production puissance variable ;  - production puissance nominale. |
| DT9 |
| Réponse | P  Cp |

Sur le graphique du DR5, apparaît le coefficient de puissance Cp. Celui-ci caractérise la puissance récupérée par l’éolienne par rapport à la puissance du vent.

De fait, la puissance mécanique de l’éolienne peut se calculer par la formule suivante :

Avec :

* ρ = 1,225 kg∙m-3 (masse volumique de l’air au niveau du sol)
* S = surface balayée par le rotor en m²
* Vvent = vitesse du vent en amont de l’éolienne en m∙s-1.
* Cp = coefficient de puissance

|  |  |
| --- | --- |
| Question 8.3 | **Compléter** les cases vides du tableau ci-dessous. |
|  |
| Réponse | |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | Vvent en m∙s-1 | ρ en kg∙m-3 | S en m² | Cp | 𝑃éolienneen MW | | début : 13 | 1.225 |  |  |  | | fin : 25 | 0.03 |  | |

|  |  |
| --- | --- |
| Question 8.4 | **Comparer** les puissances ainsi calculées à la puissance nominale de l’éolienne.  En vous aidant du diagramme DT8, **identifier** la solution technologique qui permet de réaliser cette optimisation de puissance. |
| DT8 |
| Réponse |  |