

Projet de Parc éolien du plateau de Haution

Communes de Voulpaix, La Vallée au Blé, Haution et Laigny
Département de l'Aisne

DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION D'EXPLOITER AU TITRE DES INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

- Lettre de demande
- Tome 1 : Cartographie
- Tome 2 : Etude d'impact
- **Tome 3 : Etude de dangers**
- Tome 4 : Notice Hygiène et Sécurité



Sommaire

1. PREAMBULE	6	4.3. Potentiel de danger externe	15
1.1. Objectif de l'étude de dangers	6	4.3.1. 7.2. Recensement des événements exclus de l'analyse des risques	15
1.2. Contexte législatif et réglementaire	6	4.3.2. Activités voisines	15
2. INFORMATIONS GENERALES CONCERNANT L'INSTALLATION	7	4.3.3. Voies de communication	15
2.1. Renseignements administratifs	7	4.3.3.1. Couloir aérien	15
2.1.1. Identité du porteur de projet	7	4.3.3.2. Voies routières	15
2.1.2. Identité de l'exploitant du parc	7	4.3.4. Réseaux	15
2.1.3. Identité de la société mère	7	4.3.5. Risques naturels	16
2.1.4. Identité du rédacteur de l'étude de dangers	7	4.3.5.1. Foudre	16
3. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION	8	4.3.5.2. Vents violents	16
3.1. Localisation du site	8	4.3.5.3. Formation de glace	16
3.2. Définition de l'aire d'étude	8	4.3.5.4. Risque sismique	16
3.3. Caractéristiques de l'installation	9	4.3.5.5. Risque de mouvement de terrain	16
3.3.1. Activité de l'installation	9	4.4. Réduction des potentiels de dangers à la source	17
3.3.2. Composition de l'installation	9	5. ANALYSE DES RETOURS D'EXPERIENCE	18
3.4. Fonctionnement de l'installation	9	5.1. Bases de données consultées	18
3.4.1. Fonctionnement des aérogénérateurs	9	5.2. Inventaire des accidents et incidents en France	18
3.4.2. Equipements de sécurité de l'éolienne	9	5.3. Inventaire des accidents et incidents à l'international	19
3.4.2.1. Système de sécurité contre la survitesse	9	5.4. Synthèse des phénomènes dangereux redoutés issus du retour d'expérience	20
3.4.2.2. Systèmes de sécurité contre le risque électrique	10	6. ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES	20
3.4.2.3. Autres systèmes de sécurité	10	6.1. Objectif de l'analyse préliminaire des risques	20
3.4.3. Surveillance et procédures d'arrêt	10	6.2. Méthodologie	20
3.4.4. Moyens de prévention et de lutte contre l'incendie	10	6.3. Définition de périmètres liés aux dangers	21
3.4.5. Garanties et conformité des machines	11	6.4. Grille de cotation	21
3.4.6. Conformité avec les prescriptions générales	11	6.4.1. Gravité	21
3.4.7. Opérations de maintenance de l'installation	11	6.4.2. Probabilité	22
3.4.8. Stockage et flux de produits dangereux	12	6.4.3. Cinétique	22
3.5. Fonctionnement des réseaux de l'installation	12	6.5. Risque inacceptable et risque critique : définitions	23
3.5.1. Description des réseaux - localisation des postes de livraison	12	6.5.1. Grilles de criticité	23
4. IDENTIFICATION DES POTENTIELS DANGERS DE L'INSTALLATION	13	6.5.2. Détermination du niveau de risque par combinaison des deux grilles	23
4.1. Potentiels de dangers liés aux produits	13	6.5.3. Définitions des niveaux de risque	23
4.1.1. Stockage	14	6.6. Evaluation préliminaire des risques	23
4.1.2. Hexafluorure de soufre	14	6.7. Effets dominos	28
4.1.3. Autres	14	6.8. Conclusion de l'analyse préliminaire des risques	28
4.1.4. Réflexion sur des produits de substitution	14	7. ETUDE DETAILLEE DES RISQUES	28
4.2. Potentiels de dangers liés au fonctionnement de l'installation	15	7.1. Analyse des causes et mesures de maîtrise des risques	28
		7.2. Evaluation du risque selon la méthode du calcul de l'indice de risque	29
		7.2.1. Méthodologie	29
		7.2.1. Identification de cibles	29
		7.2.2. Probabilité de défaillance d'une éolienne $P_{défaillance}$	29

7.2.3.	Probabilité d'impact sur une zone $P_{\text{trajectoire}}$	29
7.2.4.	Probabilité d'impact $P_{\text{collision}}$	30
7.2.5.	Scénario projection de pale complète	30
7.2.6.	Scénario projection d'un fragment de pale.....	30
7.2.7.	Probabilité de présence d'une vulnérabilité $P_{\text{présence}}$	30
7.2.8.	Evaluation de S_{impact}	30
7.2.9.	Evaluation de $P_{\text{présence}}$ en fonction de la densité des personnes	31
7.2.10.	Effets cumulatifs	31
7.3.	Modélisation	31
7.3.1.	Données d'entrée.....	31
7.3.2.	Cibles vulnérables	31
7.3.3.	Résultats de la modélisation	33
8.	CONCLUSION	33
9.	RESUME NON TECHNIQUE	34
9.1.	Les sources de dangers.....	34
9.2.	Etude détaillée de la situation de danger critique.....	34
9.3.	Carte des risques	34
9.4.	Conclusion de l'étude de dangers	34
10.	ANNEXE 1 : CERTIFICAT DE CONFORMITE SIEMENS AUX EXIGENCES DE L'ARRETE DU 26 AOUT 2011 ...	35
11.	ANNEXE 2 : RETOURS D'EXPERIENCE - ACCIDENTOLOGIE	38
11.1.	Recensement des incidents et accidents au niveau français	38
11.2.	Recensement des incidents et accidents au niveau international	38
11.3.	Limites d'utilisation de l'accidentologie	39
11.4.	Inventaire de l'accidentologie en France	41
12.	ANNEXE 3 : GLOSSAIRE	45
13.	ANNEXE 4 : BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES UTILISEES	47
14.	ANNEXE 5 : ETUDE BALISTIQUE	48

1. Préambule

1.1. Objectif de l'étude de dangers

La présente étude de dangers a pour objet de rendre compte de l'examen effectué par les sociétés LE HAUT BOSQUET ENERGIES et LES ROYEUX ENERGIES pour caractériser, analyser, évaluer, prévenir et réduire les risques du parc éolien du plateau de Haution, autant que technologiquement réalisable et économiquement acceptable, que leurs causes soient intrinsèques aux substances ou matières utilisées, liées aux procédés mis en œuvre ou dues à la proximité d'autres risques d'origine interne ou externe à l'installation.

Cette étude est proportionnée aux risques présentés par les éoliennes du parc du plateau de Haution. Le choix de la méthode d'analyse utilisée et la justification des mesures de prévention, de protection et d'intervention sont adaptés à la nature et la complexité des installations et de leurs risques.

Elle précise l'ensemble des mesures de maîtrise des risques mises en œuvre sur le parc éolien du plateau de Haution, qui réduisent le risque à l'intérieur et à l'extérieur des éoliennes à un niveau jugé acceptable par l'exploitant.

Ainsi, cette étude permet une approche rationnelle et objective des risques encourus par les personnes ou l'environnement, en satisfaisant les principaux objectifs suivants :

- améliorer la réflexion sur la sécurité à l'intérieur de l'entreprise afin de réduire les risques et optimiser la politique de prévention ;
- favoriser le dialogue technique avec les autorités d'inspection pour la prise en compte des parades techniques et organisationnelles dans l'arrêté d'autorisation ;
- informer le public dans la meilleure transparence possible en lui fournissant des éléments d'appréciation clairs sur les risques.

1.2. Contexte législatif et réglementaire

Les objectifs et le contenu de l'étude de dangers sont définis dans la partie du Code de l'environnement relative aux installations classées. Selon l'article L. 512-1, l'étude de dangers expose les risques que peut présenter l'installation pour les intérêts visés à l'article L. 511-1 en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'installation.

L'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation fournit un cadre méthodologique pour les évaluations des scénarios d'accident majeurs. Il impose une évaluation des accidents majeurs sur les personnes uniquement et non sur la totalité des enjeux identifiés dans l'article L. 511-1. En cohérence avec cette réglementation et dans le but d'adopter une démarche proportionnée, l'évaluation des accidents majeurs dans l'étude de dangers d'un parc d'aérogénérateurs s'intéressera prioritairement aux dommages sur les personnes. Pour les parcs éoliens, les atteintes à l'environnement, l'impact sur le fonctionnement des radars et les problématiques liées à la circulation aérienne font l'objet d'une évaluation détaillée au sein de l'étude d'impact.

Ainsi, l'étude de dangers a pour objectif de démontrer la maîtrise du risque par l'exploitant. Elle comporte une analyse des risques qui présente les différents scénarios d'accidents majeurs susceptibles d'intervenir. Ces scénarios sont caractérisés en fonction de leur probabilité d'occurrence, de leur cinétique, de leur intensité et de la gravité des accidents potentiels. Elle justifie que le projet permet d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation.

Selon le principe de proportionnalité, le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation, compte tenu de son environnement et de sa vulnérabilité. Ce contenu est défini par l'article R. 512-9 du Code de l'environnement :

- description de l'environnement et du voisinage
- description des installations et de leur fonctionnement
- identification et caractérisation des potentiels de danger
- estimation des conséquences de la concrétisation des dangers
- réduction des potentiels de danger
- enseignements tirés du retour d'expérience (des accidents et incidents représentatifs)
- analyse préliminaire des risques
- étude détaillée de réduction des risques
- quantification et hiérarchisation des différents scénarios en terme de gravité, de probabilité et de cinétique de développement en tenant compte de l'efficacité des mesures de prévention et de protection
- représentation cartographique
- résumé non technique de l'étude des dangers.

De même, la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 précise le contenu attendu de l'étude de dangers et apporte des éléments d'appréciation des dangers pour les installations classées soumises à autorisation.

Enfin, l'étude de dangers s'intéresse aux risques générés par les aérogénérateurs lorsqu'ils sont en phase d'exploitation. **Elle exclut donc la phase de construction.**

2. Informations générales concernant l'installation

2.1. Renseignements administratifs

2.1.1. Identité du porteur de projet

Dénomination ou raison sociale : LE HAUT BOSQUET ENERGIES

Forme juridique : Société par actions simplifiée (SAS)

Adresse du siège social : 213 cours Victor Hugo - 33323 BEGLES CEDEX

Noms, prénoms et qualité du signataire de la demande :

Monsieur Jean-Yves GRANDIDIER, gérant

SIRET : 751 091 075 R.C.S. BORDEAUX

APE : 3511 Z Production d'électricité

Capital social : 1 000 €

LE HAUT BOSQUET ENERGIES est une société filiale à 50 % de la société mère VALOREM 50% de la société mère ELECTRAWINDS.

Dénomination ou raison sociale : LES ROYEUX ENERGIES

Forme juridique : Société par actions simplifiée (SAS)

Adresse du siège social : 213 cours Victor Hugo - 33323 BEGLES CEDEX

Noms, prénoms et qualité du signataire de la demande :

Monsieur Luc DESENDER, gérant

SIRET : 751 093 725 R.C.S. BORDEAUX

APE : 3511 Z Production d'électricité

Capital social : 1 000 €

LES ROYEUX ENERGIES est une société filiale à 50 % de la société mère VALOREM et 50% de la société ELECTRAWINDS FRANCE.

2.1.2. Identité des exploitants du parc

Dénomination sociale : VALEMO

Forme juridique : Société à responsabilité limitée

Adresse du siège social : 213, Cours Victor Hugo, 33130 BEGLES

Date d'immatriculation : le 2 janvier 2006

N° SIRET : 487 803 777 00035

APE : 4321A - travaux d'installation électrique dans tous locaux

Capital social : 92 070,00 euros

Direction :

Président : Jean Yves GRANDIDIER

Directeur Général : Frédéric PREVOST

VALEMO est une société filiale à 100 % de la société mère VALOREM.

Dénomination sociale : ELECTRAWINDS (service exploitation)

Forme juridique : NV, société de droit Belge

Adresse du service : John Cordierlaan 9 - 8400 Oostende, Belgique

Directeur du service exploitation : Dirk DEWENTTINCK

Manager : Dries BOOY

Conseiller impact environnemental : Bruno CLEMENS

2.1.3. Identité de la société mère

Dénomination sociale : VALOREM

Forme juridique : Société par Action Simplifiée

Adresse du siège social : 213, Cours Victor Hugo, 33 323 BEGLES

Date d'immatriculation : le 12 juillet 1994

N° SIRET : 395 388 739 00108.

APE : 7112B - ingénierie, études techniques

Capital social : 8 386 768,00 euros

Président : Jean Yves GRANDIDIER

Directeur Général : Pierre GIRARD

Dénomination sociale : ELECTRAWINDS France

Forme juridique : Société par Action Simplifiée

Adresse du siège social : 25, Avenue de l'Opéra, 75001 PARIS

Date d'immatriculation : le 21/02/2012 (pour le siège à Paris) ou 1/12/2008 pour le début d'exploitation

N° SIRET : 501 530 299 00038.

APE : 3511 Z Production d'électricité

Capital social : 1 000 000,00 euros

Président : LDS NV - SOCIETE DE DROIT ETRANGER représentée par Desender Luc

2.1.4. Identité du rédacteur de l'étude de dangers

L'étude de dangers d'un parc éolien du Plateau de Haution a été conduite et rédigée conjointement par VALOREM et AIRELE :

Céline BONNET, Chargée d'Etude Environnement, Bureau d'Etudes de VALOREM

Sylvain MONTREAU, chef de projet du Bureau d'Etudes AIRELE

AIRELE a également réalisé l'étude balistique jointe en annexe 5 de ce rapport.

AIRELE

ZAC du Chavement

59286 Roost Warendin

03 27 97 36 39



3. Description de l'installation

Ce chapitre a pour objectif de caractériser l'installation envisagée ainsi que son organisation et son fonctionnement, afin de permettre d'identifier les principaux potentiels de danger qu'elle représente (chapitre 4), au regard notamment de la sensibilité de l'environnement décrit précédemment.

3.1. Localisation du site

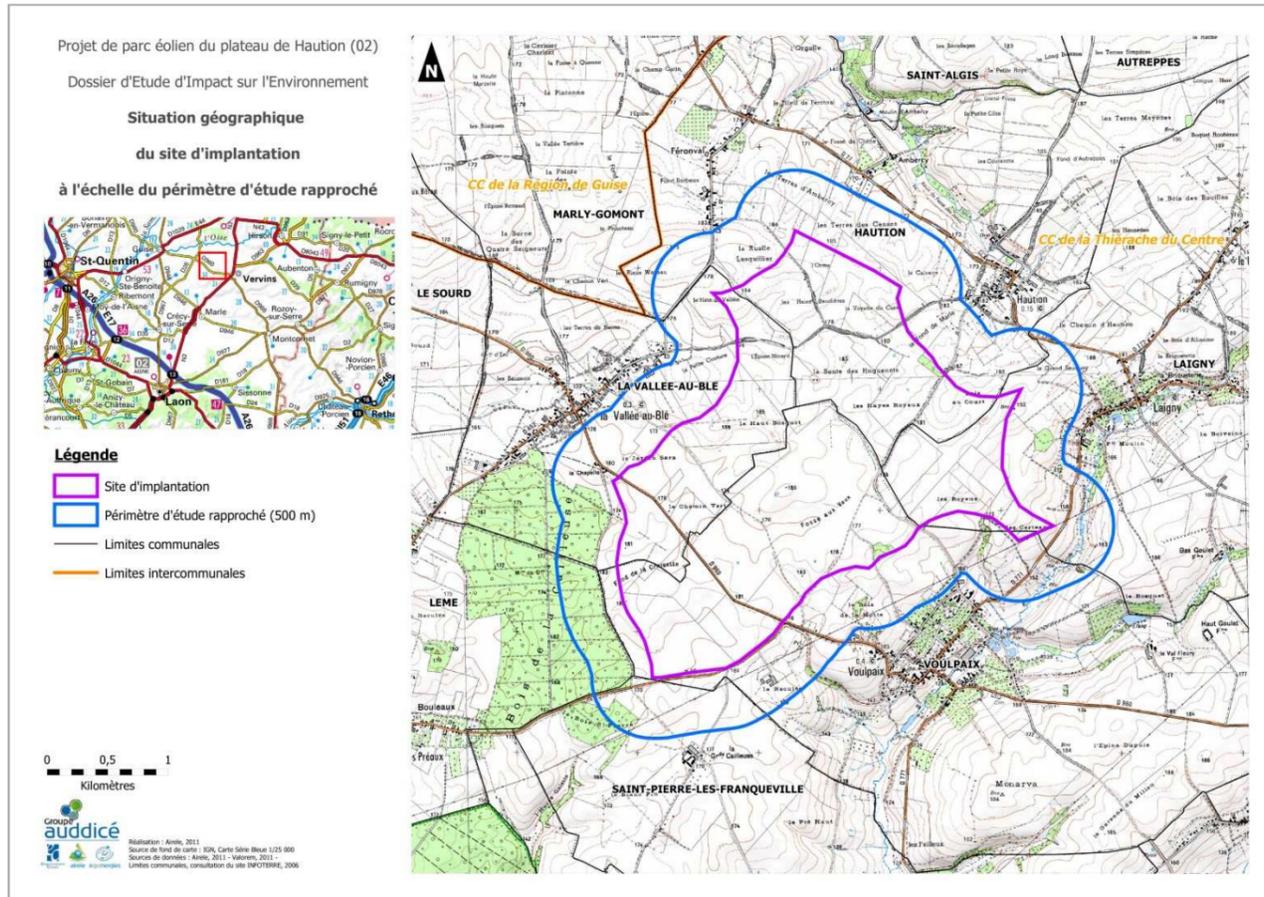
Le parc éolien du Plateau de Haution est situé dans le département de l'Aisne, sur les trois communes d'Haution, Voulpaix et la Vallée-au-Blé.

3.2. Définition de l'aire d'étude

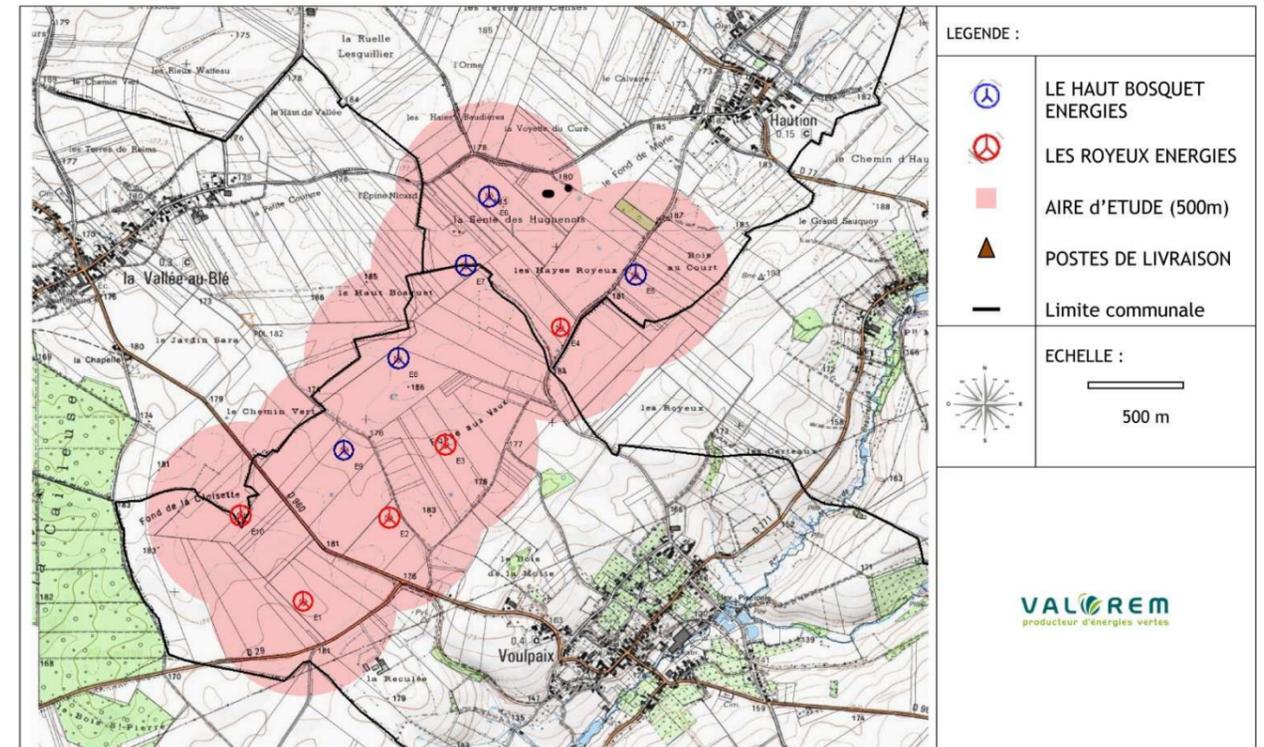
Compte tenu des spécificités de l'organisation spatiale d'un parc éolien, composé de plusieurs éléments disjoints, la zone sur laquelle porte l'étude de dangers est constituée d'une aire d'étude par éolienne.

Chaque aire d'étude correspond à l'ensemble des points situés à une distance inférieure ou égale à 500 mètres à partir de l'emprise du mât de l'éolienne. Cette distance équivaut à la distance d'effet retenue pour les phénomènes de projection.

Nota : La zone d'étude n'intègre pas les environs des postes de livraison, qui est néanmoins représenté sur la carte ci-dessous. Les expertises réalisées dans le cadre du guide INERIS/FEE ont en effet montré l'absence d'effet à l'extérieur du poste de livraison pour chacun des phénomènes dangereux potentiels pouvant l'affecter.



Localisation du site



Plan de localisation des éoliennes, des postes de livraison et de l'aire d'étude

3.3. Caractéristiques de l'installation

3.3.1. Activité de l'installation

L'activité principale du parc éolien du Plateau de Haution est la production d'électricité à partir de l'énergie mécanique du vent. Cette installation est donc soumise à la rubrique 2980 des installations classées pour la protection de l'environnement.

3.3.2. Composition de l'installation

Le parc éolien du Plateau de Haution est composé de 10 aérogénérateurs et de 2 postes de livraison. Chaque aérogénérateur a une hauteur de moyeu de 122,5 mètres et un diamètre de rotor de 113 mètres, soit une hauteur totale en bout de pale de 179 mètres.

Le tableau suivant indique les coordonnées géographiques des aérogénérateurs et des postes) de livraison dans le système de coordonnées NTF Lambert II étendu :

Numéro de l'éolienne	Longitude (X)	Latitude (Y)	Altitude en mètres NGF
1	705838,00	2539259,00	174,70
2	706293,17	2539741,86	178,55
3	706586,17	2540166,11	176
4	707189,40	2540846,62	185,20
5	707588,04	2541155,00	182,25
6	706794,18	2541583,87	183,60
7	706675,62	2541187,48	185,10
8	706324,43	2540653,00	183,20
9	706037,94	2540123,66	177,50
10	705493,96	2539743,87	179,10
Poste de Livraison 1	705509	2540845	174
Poste de Livraison 2	705518	2540834	174

3.4. Fonctionnement de l'installation

3.4.1. Fonctionnement des aérogénérateurs

Le fonctionnement d'un parc éolien est présenté dans l'étude d'impact, notamment dans le « *Chapitre 1 - Présentation du site* » qui consacrent 5 paragraphes à la présentation des caractéristiques techniques du projet (éoliennes, postes de livraison, raccordement des éoliennes au poste source par un réseau électrique enterré, phasage du chantier).

3.4.2. Equipements de sécurité de l'éolienne

Un modèle type d'éolienne est décrit dans ce chapitre et correspond aux critères techniques principaux retenus.

Le choix définitif des éoliennes (modèle et constructeur) sera fait dans cette gamme de matériel (taille, puissance, performance, aspect et production sonore) pour combiner un parc répondant à toutes les exigences de l'ensemble des études présentées dans ce dossier.

Les dimensions des éléments constituant l'éolienne choisie pourront s'écarter de celui de l'éolienne type (plus ou moins quelques mètres), sans toutefois dépasser la hauteur maximale de 180 mètres.

Le modèle d'éolienne retenu répondra à toutes les exigences de l'ensemble des études présentées dans ce dossier. Le type d'éolienne envisagé est issu de la gamme standard de différents constructeurs. On peut citer pour exemple les constructeurs d'éoliennes Vestas, Nordex, Gamesa, Repower, Enercon, General Electric, Acciona. La puissance unitaire de chaque machine sera de l'ordre de 2 à 2,5 MW.

Les caractéristiques des éoliennes qui seront implantées sur le site (type SIEMENS SWT113 ou équivalent) sont présentées dans le tableau suivant :

CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	
Modèle éolienne	SIEMENS SWT-2,3-113
Puissance (MW)	2,3 MW
Classification	Classe II
Plage de vitesse nominale (tpm)	8-13
Vitesse maximale avant coupure (tpm)	18
Hauteur en sommet de nacelle (m)	126
Longueur pale (m)	55
Diamètre rotor (m)	113

3.4.2.1. Système de sécurité contre la survitesse

Chaque éolienne est équipée d'un système de détection de fonctionnement anormal de l'installation, en cas d'entrée en survitesse de la machine.

Frein aérodynamique dit « *pitch system* » : Il permet de changer l'orientation des pales sur le moyeu et ainsi modifier l'énergie récupérée par l'éolienne. Ce système permet d'arrêter l'éolienne en positionnant les pales en drapeau et en réduisant donc la prise au vent. Il comprend également des accumulateurs pour secourir l'installation en cas de coupure du réseau électrique ou perte du contrôle. Toutes les fonctions des éoliennes sont surveillées et pilotées par un système de commande par microprocesseurs. La régulation du pas est activée

par un système hydraulique via des vérins et permet une rotation des pales de $\pm 90^\circ$. Ce système fournit également la pression nécessaire au système de freinage situé sur le rotor.

La régulation « STALL » dit à « pas fixe » :

C'est un système de sécurité passif. Il agit comme un frein naturel par le décrochage aérodynamique de la pale du rotor. Cet effet est obtenu grâce à un phénomène naturel : la diminution de la portance d'une pale lorsque l'attaque du vent est trop forte.

3.4.2.2. Systèmes de sécurité contre le risque électrique

La génératrice située dans la nacelle comporte deux parties qui fournissent chacune une tension électrique de 690V AC, ainsi qu'une autre variable allant jusqu'à 480V AC. Par la suite, ces deux tensions ne font qu'une en 690V AC. Cette tension est transformée par un transformateur isolé en pied de mât. La tension est élevée à 20kV et est transportée par un câble enterré jusqu'à la cellule de coupure HTA en pied de mât. Elle est ensuite acheminée jusqu'au poste de livraison.

Protection des systèmes électriques :

- Système de contrôle de la génératrice ;
- Refroidissement du générateur par un système forcé de circulation d'air ;
- Régulation électronique du courant dans l'armoire de contrôle en pied de mât ;
- Cellule isolante de coupure haute tension ;
- Système de contrôle de la rotation de la nacelle pour éviter la torsion du câble électrique ;
- Mise à la terre du châssis et des équipements.

3.4.2.3. Autres systèmes de sécurité

Balisage aéronef

Chaque éolienne est balisée avec un système visuel lumineux pour les aéronefs, conformément aux dispositions prises en application des articles L.6351-6 et L.6352-1 du Code des Transports et des articles R.243-1 et R.244-1 du Code de l'Aviation Civile.;

L'alimentation principale du balisage lumineux est donnée par le réseau électrique. En cas de panne, une armoire d'alimentation de secours est prévue au pied des éoliennes. Le circuit électronique du chargeur de batteries comporte des relais d'alarmes permettant de prévenir l'utilisateur de défauts pouvant survenir dans le fonctionnement du balisage, notamment en cas de coupure de l'alimentation générale ou encore de dysfonctionnement du chargeur. L'autonomie en cas de panne du réseau est au minimum de 12 heures.

Frein à disque

Un frein à disque hydraulique est présent pour bloquer l'éolienne à l'arrêt ; il s'agit d'un frein mécanique sur l'arbre de transmission à l'intérieur de la nacelle ;

Systèmes de refroidissement

La nacelle, le moyeu, le générateur et le transformateur sont refroidis par circulation d'air ;

L'huile de lubrification du multiplicateur et le liquide à base d'eau glycolée du convertisseur sont refroidies par un échangeur air/huile & air/eau situé sur le toit de la nacelle.

Équipement contre la foudre

Un paratonnerre est installé sur la nacelle. Les pales sont protégées par des tresses en cuivre qui font contact avec des balais au niveau des parties tournantes et acheminent le courant vers la terre. L'équipement

électrique et hydraulique qui se trouve à l'intérieur du moyeu est entièrement protégé par la cage de Faraday du moyeu même ;

Le système de mise à la terre de la tour est assuré par un ensemble de câbles de terres individuelles, intégrées dans les fondations et connecté à la barre de terre au bas de la tour conformément à l'article 9 de l'arrêté du 26 août 2011.

Système de détection du givre

Des sondes vibratoires ainsi que des sondes de températures sont situées sur la nacelle et dans les pales. En cas de détection de vibrations qui témoignent une accumulation de glace, l'éolienne est mise à l'arrêt.

3.4.3. Surveillance et procédures d'arrêt

Le système de contrôle général pour la SIEMENS SWT113, s'effectue en continu par le WTC (Wind Turbine Controller). Ce contrôleur supervise l'ensemble du système, y compris la régulation de l'angle des pales / la position au vent de la nacelle etc.

Différents détecteurs mesurent certains paramètres qui sont surveillés par les microprocesseurs :

- Vitesse du vent ;
- Angle des pales ;
- Vitesse de rotation de l'arbre rapide et de l'arbre lent ;
- Température extérieure, intérieure et de certains équipements ;
- Vibration de la nacelle ;
- Vibration du multiplicateur ;
- Pression d'huile hydraulique et d'huile de lubrification ;
- Détecteur de niveau bas dans les circuits liquides ;
- Détecteurs d'arc électrique dans le local transformateur et dans l'armoire du jeu de barres.

Une procédure de mise à l'arrêt de la machine est programmée par différentes actions :

- Commande manuelle en pied de tour ;
- Détection d'anomalie par les microprocesseurs.

La mise en défaut de l'un des paramètres induit la mise en sécurité (arrêt) de la machine.

3.4.4. Moyens de prévention et de lutte contre l'incendie

Les personnels intervenants sur les éoliennes, tant pour leur montage, que pour leur maintenance, sont des personnels du turbinier ou de sociétés de maintenance spécialisée, formés au poste de travail et informés des risques présentés par l'activité.

Le personnel a les habilitations électriques nécessaires.

Des moyens de prévention contre les risques électriques, contre les risques de surtension et contre la foudre sont des moyens de prévention contre le risque d'incendie (voir les équipements associés).

La machine Siemens SWT 113 dispose d'un capteur de fumée dans chaque armoire principale, dans la nacelle et dans le transformateur.

Lors du déclenchement des alarmes incendie de la machine, une information est envoyée vers le constructeur et l'exploitant au centre de télésurveillance qui peut alerter les secours, mise à l'arrêt de la machine.

Deux extincteurs sont situés à l'intérieur des éoliennes, dans la nacelle et au pied de celles-ci.

3.4.5. Garanties et conformité des machines

Les éoliennes qui seront installées seront des machines conformes à la directive 06/42/CE qui définit les objectifs ou "exigences essentielles" en matière de sécurité et de santé auxquels doivent répondre, lors de leur fabrication et avant leur mise sur le marché, les machines et les composants de sécurité.

Elles disposent d'un certificat de conformité aux dispositions de la norme NF EN 61 400-1 dans sa version de juin 2006 ou CEI 61 400-1 dans sa version de 2005 ou toute norme équivalente en vigueur dans l'Union européenne ; Article 8 de l'arrêté du 26 aout 2011.

3.4.6. Conformité avec les prescriptions générales

L'exploitant du parc éolien du Plateau de Haution s'engage à respecter la réglementation en vigueur en matière de sécurité en étant conforme aux prescriptions de l'arrêté ministériel relatif aux installations soumises à autorisation au titre de la rubrique 2980 des installations classées relatives à la sécurité de l'installation.

Les prescriptions générales liées à la sécurité des machines seront respectées par le fabricant SIEMENS (cf. annexe 1 : *Tableau de conformité SIEMENS aux dispositions de l'arrêté du 26/08/2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement*).

3.4.7. Opérations de maintenance de l'installation

La maintenance est assurée par le constructeur SIEMENS, par contrat avec l'exploitant.

Le planning de maintenance prévu par SIEMENS de l'aérogénérateur sera conforme aux prescriptions de l'arrêté du 26/08/2011 (voir l'annexe 1 Tableau de conformité SIEMENS aux dispositions de l'arrêté du 26/08/2011).

Notamment, pour les tâches de maintenance annuelle, SIEMENS prévoit :

1. Inspection des boulons (vérification au niveau de la nacelle, rotor et pales avec serrage selon planification) ;
2. Contrôle des pales :
 - détection de fissures et bruits inhabituels pendant le fonctionnement,
 - contrôle de l'intérieur des pales,
 - contrôle des systèmes de protection anti-foudre,
3. Système de lubrification des roulements de pales :
 - remplacement/vidage des godets de vidange,
 - ajout de graisse neuve,
 - contrôle de lubrification des roulements,
4. Circuit foudre :
 - contrôle de contacts allant des pales jusqu'aux fondations,
 - contrôle des cartes de détection de foudre.
5. Armoires électriques :
 - vérification et tests des capteurs de température,

- vérification et tests des détecteurs de fumée,
 - vérification et tests des ventilateurs,
 - remplacement des filtres à air,
6. Convertisseur:
 - idem contrôle armoires électriques,
 - contrôle du système de refroidissement,
 - remplacement du liquide de refroidissement suivant planification,
 7. Système central de lubrification des roulements et du système d'orientation :
 - remplissage de graisses neuves,
 - contrôle de l'absence de fuite,
 8. Systèmes hydrauliques (frein, rotation de pales, grue, capot de nacelle et multiplicateur si applicable) :
 - prélèvement d'échantillon d'huile,
 - remplacement des filtres,
 - contrôle du système de refroidissement,
 - vérification d'absence de fuite,
 - Vérification des pompes,
 - vérification et tests des capteurs de niveaux, de pression et de température,
 - vérification des vannes, soupapes et accumulateurs,
 9. Réglage de l'alignement de la génératrice et vérification des connections mécaniques ;
 10. Vérification et resserrage de tous les raccordements électriques (système de commande, convertisseur, réactance principale, disjoncteur principal, et génératrice).
 11. Contrôles mécaniques (système d'orientation, génératrice et multiplicateur si applicable) :
 - Inspection des engrenages,
 - vérification du graissage,
 - contrôle d'usure,
 - contrôle des supports d'amortissement,
 12. Système de freinage :
 - contrôle visuel du disque de frein,
 - contrôle des garnitures,
 13. Test des systèmes de sécurité :
 - contrôle des capteurs de survitesse (tests et simulations de régime de survitesse),
 - contrôle des systèmes de détection de vibrations (tests et simulations de balourd),
 - contrôle des boutons d'arrêt d'urgence,
 14. Nacelle :
 - contrôle des joints et capots,
 - contrôle de la grue de service,
 - nettoyage de la nacelle,
 15. Tour :

- contrôle visuel des points d'ancrage,
- contrôle de corrosion,
- écaillage de peinture sur la tour,
- recherche de pénétration d'eau et de fissures dans le scellement,
- contrôle de l'ascenseur de service,
- nettoyage des plateformes.

3.4.8. Stockage et flux de produits dangereux

Conformément à l'article 16 de l'arrêté du 26 août 2011, aucun produit dangereux ne sera stocké dans les éoliennes du parc du Plateau de Haution.

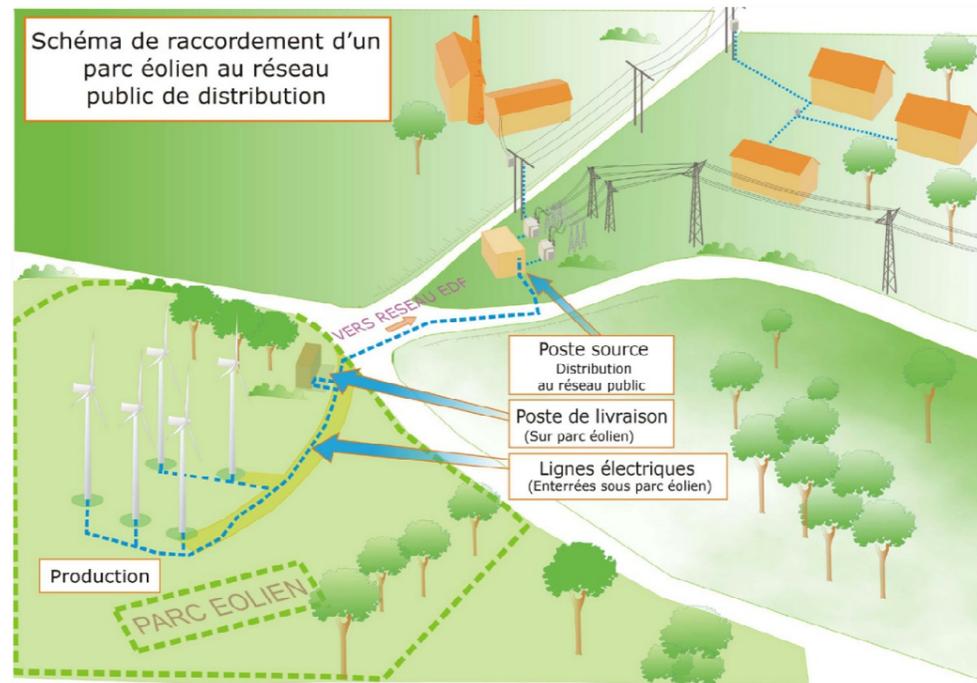
3.5. Fonctionnement des réseaux de l'installation

3.5.1. Description des réseaux - localisation des postes de livraison

L'électricité sera fournie en 690 V, tension relevée en 20 kV par un transformateur placé dans le mât tubulaire. Il est de type à huile et dispose de systèmes de parafoudre.

Le réseau inter-éolien relie le transformateur de chaque éolienne à un poste de livraison commun.

Une autre ligne enterrée relie le poste de livraison au poste du réseau ERDF local pour permettre l'évacuation de l'électricité produite. Dans le cas du projet du plateau de Haution, 2 postes de livraison seront nécessaires pour l'ensemble des éoliennes. Les dimensions des postes de livraison sont : longueur : 12 m, largeur : 3 m et hauteur : 3 m. Les raccordements sont réalisés au moyen de câbles normalisés enfouis.



Composants du parc éolien (Source : ADEME)

Le raccordement électrique du parc éolien pourra être envisagé sur le poste source de La Capelle, situé à environ 22 km des 2 postes de livraison.

Conformément à la procédure de raccordement en vigueur, un chiffrage précis du raccordement au réseau électrique sera effectué ultérieurement par le gestionnaire du réseau, dès réception de la notification du délai d'instruction du permis de construire. Les dispositions imposées par le gestionnaire du réseau dans la convention de raccordement seront suivies par le maître d'ouvrage et précisées dans le cahier des charges des entreprises missionnées. Les nouveaux équipements HTA issus raccordement du projet, dont le coût est en grande partie supporté par le producteur (taux de réfaction), seront rétrocédés au gestionnaire de réseaux qui pourra les utiliser par la suite pour raccorder d'autres utilisateurs.

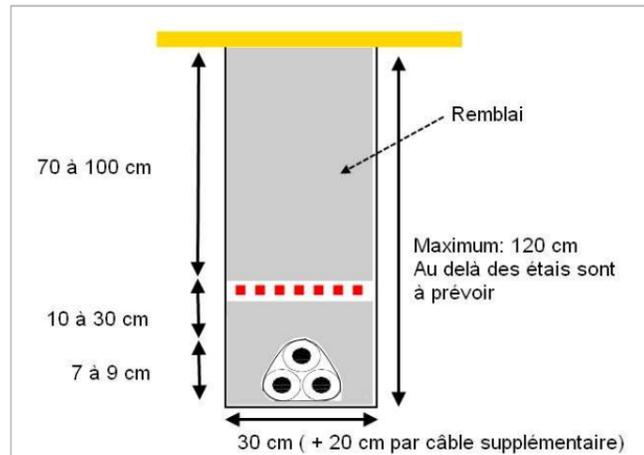
Les conditions de raccordement depuis les postes de livraison vers le réseau électrique existant seront conformes au décret n°2008-386 du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques générales de conception et de fonctionnement pour le raccordement d'installations de production aux réseaux publics d'électricité, complété par deux arrêtés d'application de même date (publiés au Journal Officiel du 25 avril 2008).

L'énergie électrique produite par les éoliennes sera évacuée par un réseau de câbles souterrains connectés aux postes de livraison électrique implantés sur la commune de La Vallée au Blé. Ces postes comportent les cellules de raccordement, protections, compteur... nécessaires au fonctionnement du parc éolien. Le raccordement entre le poste de livraison et le poste source de La Capelle sera réalisé grâce à un câble électrique HTA enterré de 20 kV sur environ 22 km (tracé remanié) en accord avec la politique nationale d'enfouissement du réseau.

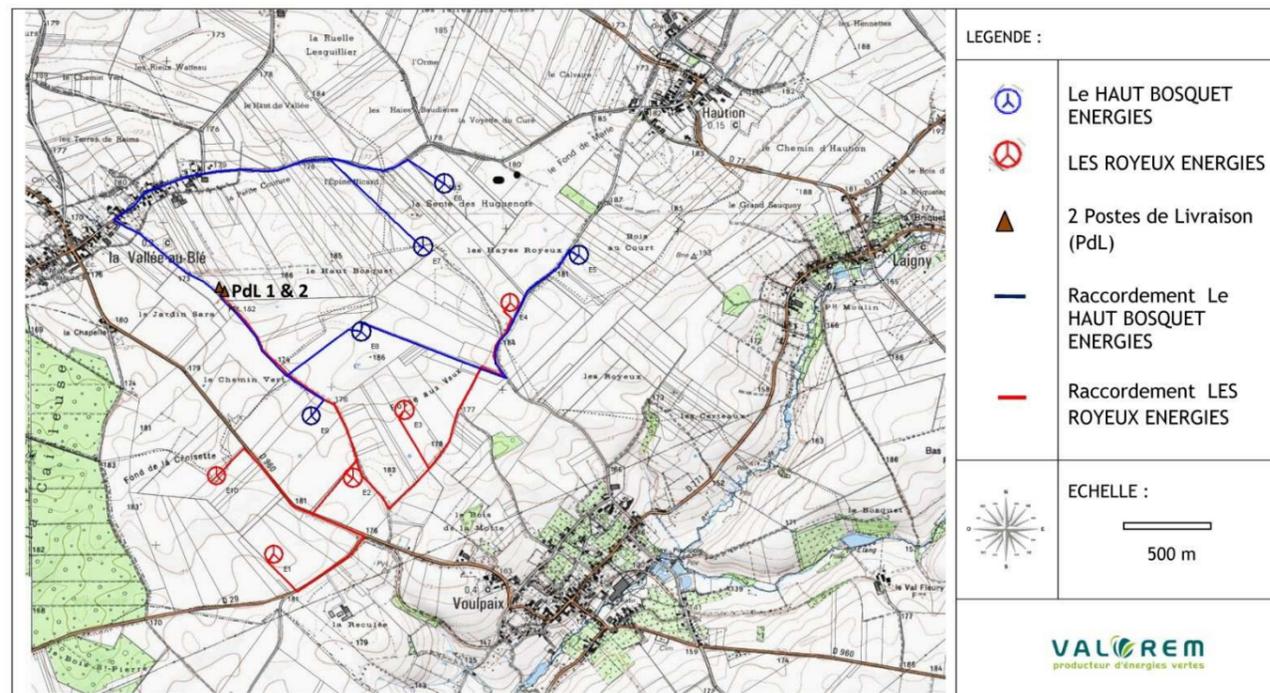
Le parc éolien du Plateau de Haution ne comporte aucun réseau d'alimentation en eau potable ni aucun réseau d'assainissement. De même, les éoliennes ne sont reliées à aucun réseau de gaz.



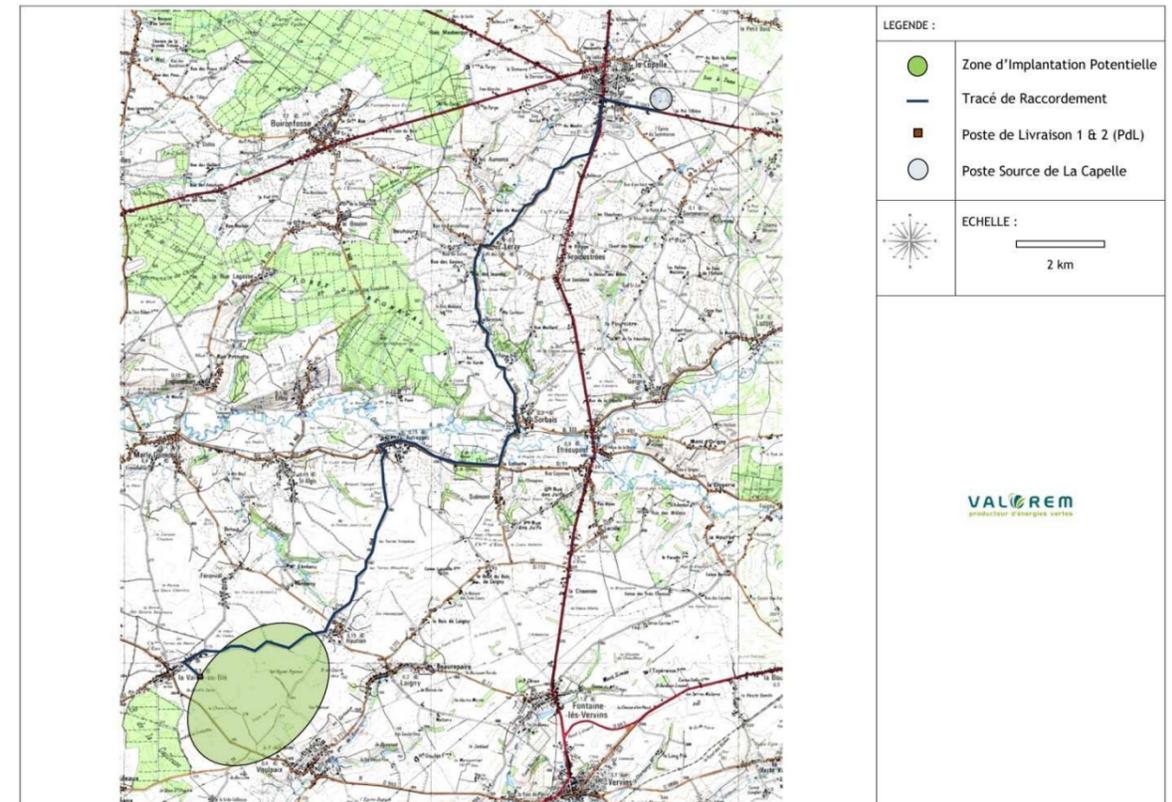
Tranchée pour le raccordement au réseau local (Photos : VALOREM)



Coupe de tranchée pour enfouissement de ligne



Tracé du réseau électrique inter-éolien et localisation des postes de livraison



Tracé du réseau électrique entre les postes de livraison et le poste source de La Capelle

4. Identification des potentiels dangers de l'installation

Ce chapitre de l'étude de dangers a pour objectif de mettre en évidence les éléments de l'installation pouvant constituer un danger potentiel, que ce soit au niveau des éléments constitutifs des éoliennes, des produits contenus dans l'installation, des modes de fonctionnement, etc.

L'ensemble des causes externes à l'installation pouvant entraîner un phénomène dangereux, qu'elles soient de nature environnementale, humaine ou matérielle, seront traitées dans l'analyse de risques.

4.1. Potentiels de dangers liés aux produits

La production d'électricité par les éoliennes ne consomme pas de matières premières, ni de produits pendant la phase d'exploitation. De même, elle ne génère pas de déchet, ni d'émission atmosphérique, ni d'effluent potentiellement dangereux pour l'environnement.

Les produits identifiés dans le cadre du parc éolien du Plateau de Haution sont utilisés pour le bon fonctionnement des éoliennes, leur maintenance et leur entretien :

- Produits nécessaires au bon fonctionnement des installations (graisses et huiles de transmission, huiles hydrauliques pour systèmes de freinage...), qui une fois usagés sont traités en tant que déchets industriels spéciaux
- Produits de nettoyage et d'entretien des installations (solvants, dégraissants, nettoyants...) et les déchets industriels banals associés (pièces usagées non souillées, cartons d'emballage...)

Conformément à l'article 16 de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations éoliennes soumises à autorisation, aucun produit n'est stocké dans les aérogénérateurs ou les postes de livraison.

La liste des produits utilisés pour le bon fonctionnement des aérogénérateurs SIEMENS SWT 2.3-113 sont les suivants :

Lieux	Substance	Volume	Unité	Type
Nacelle				
Système de rotation nacelle	graisse	6	l	Optipit (Castrol)
Engrenages	graisse	8*7,6	l	Optigear synthetic XVG320
Roulement principal	graisse	15	l	Klüberplex BEM 41-141
Générateur à graisse	graisse	2	l	Klüberplex BEM 41-141
Système hydraulique	huile	130	l	Castrol Hyspin AWH-M32
Accumulateurs de freins hydrauliques	Azote	16	l	Azote
Rotor				
Roulement pitch system	graisse	8	l	Shell Rhodina BBZ
Accumulateurs pitch system	huile	90	l	Castrol Hyspin AWH-M32
Accumulateurs pitch system	Azote	180	l	Azote
Tour				
Système de refroidissement du générateur	Eau+glycol	150	l	BASF Glycantin G30
Transformateur	Ester oil	1160	kg	Midel 7131
MV frein	SF6	4,4	kg	Siemens 8DH10

Les risques associés à ces produits sont les suivants :

risques	causes et origines
- Incendie flux thermique, - Déversement et pollution éventuelle du sol et de l'eau	- Malveillance - Etincelles suite à un dysfonctionnement électrique - Echauffement des organes mécaniques - Utilisation d'une flamme sans permis de feu - Fuite

4.1.1. Stockage

Les volumes d'huile des multiplicateurs, de la graisse nécessaire au bon fonctionnement des moteurs, roulements et pompes ainsi que les fluides du système hydraulique ne sont pas considérés comme du stockage dans la mesure où ils sont intégrés à la machine et sont nécessaires à son bon fonctionnement.

Aucun produit n'est stocké dans les machines :

- ni les produits d'entretien / de nettoyage
- de tout ou partie de la machine elle-même
- des outils nécessaires aux maintenances

- ni les produits employés pour les maintenances

- ni les déchets issus de la maintenance (même dans le cas ou une maintenance dure plusieurs jours).

Quelle que soit la situation, l'ensemble des produits employés pour la maintenance ainsi que les éventuels déchets dangereux générés par le travail effectué sont remontés par les équipes intervenantes, et ne sont jamais laissés dans l'éolienne.

4.1.2. Hexafluorure de soufre

L'hexafluorure de soufre (SF6) est le gaz utilisé comme milieu isolant pour les cellules de protection électrique (situées en pied de machine). Il est non toxique pour l'homme à condition de rester dans certaines limites de mélange SF₆ - air (80% - 20%). Il n'y a pas de risque de confinement et d'exposition pour les populations. C'est un gaz non inflammable.

4.1.3. Autres

L'ensemble des substances et produits utilisés répondent aux exigences de la Directive Européenne relative à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses (Directive 67/548/CEE du Conseil, du 27 juin 1967, concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses ; modifiée par le nouveau règlement (CE) N° 1272/2008 et la création de l'Agence Européenne des produits chimiques).

Aucune substance ou produit utilisé ne sont classifiés comme CMR (Cancérogène, Mutagène, Repro-toxique) au sens de l'article R4411-1 et suivants du code du travail.

4.1.4. Réflexion sur des produits de substitution

Les produits présents sur chaque éolienne (huile, fluide de refroidissement, graisse) sont des produits classiques utilisés dans ce type d'activité. Ils ne présentent pas de caractère dangereux marqué. Il n'est donc pas envisagé de produits de substitution.

4.2. Potentiels de dangers liés au fonctionnement de l'installation

Les dangers liés au fonctionnement du parc éolien du Plateau de Haution sont de quatre types :

- Chute d'éléments de l'aérogénérateur (boulons, morceaux d'équipements, etc.)
- Projection d'éléments (morceau de pale, brides de fixation, etc.)
- Effondrement de tout ou partie de l'aérogénérateur
- Incendie aérogénérateur ou poste de livraison.

Ces dangers potentiels sont recensés dans le tableau suivant :

Installation ou système	Fonction	Phénomène redouté	Danger potentiel
Système de transmission	Transmission d'énergie mécanique	Survitesse	Incendie
Pale	Prise au vent	Bris de pale ou chute de pale	Projection de pales ou débris
Aérogénérateur	Production d'énergie électrique à partir d'énergie éolienne	Effondrement	Energie cinétique de chute
Transformateur, intérieur de l'aérogénérateur	Réseau électrique	Court-circuit interne	Incendie
Nacelle	Protection des équipements destinés à la production électrique	Chute d'éléments	Energie cinétique de chute
Rotor	Transformer l'énergie éolienne en énergie mécanique	Projection d'objets	Energie cinétique de projection
Nacelle	Protection des équipements destinés à la production électrique	Chute de nacelle	Energie cinétique de chute

4.3. Potentiel de danger externe

L'inventaire des risques naturels et technologiques a été réalisé dans l'étude d'impact. Sont repris ici dans les grandes lignes les dangers externes pouvant entraîner un événement redouté.

4.3.1. 7.2. Recensement des événements exclus de l'analyse des risques

Comme cela est précisé dans la circulaire du 10 mai 2010, les événements suivants sont exclus de l'analyse des risques :

- chute de météorite,
- séisme d'amplitude supérieure aux séismes maximums de référence éventuellement corrigés de facteurs, tels que définis par la réglementation applicable aux installations classées considérées,
- crues d'amplitude supérieure à la crue de référence, selon les règles en vigueur,
- événements climatiques d'intensité supérieure aux événements historiquement connus ou prévisibles pouvant affecter l'installation, selon les règles en vigueur,

- chute d'avion hors des zones de proximité d'aéroport ou aérodrome (rayon de 2 km des aéroports et aérodromes),
- rupture de barrage de classe A ou B au sens de l'article R. 214-112 du Code de l'environnement ou d'une digue de classe A, B ou C au sens de l'article R. 214-113 du même code,
- actes de malveillance.

D'autre part, plusieurs autres agressions externes qui ont été détaillées dans l'état initial peuvent être exclues de l'analyse préliminaire des risques car les conséquences propres de ces événements, en termes de gravité et d'intensité, sont largement supérieures aux conséquences potentielles de l'accident qu'ils pourraient entraîner sur les éoliennes. Le risque de sur-accident lié à l'éolienne est considéré comme négligeable dans les cas des événements suivants :

- Inondations,
- Séismes d'amplitude suffisante pour avoir des conséquences notables sur les infrastructures,
- Incendies de cultures ou forêts,
- Pertes de confinement de canalisations de transport de matières dangereuses,
- Explosions ou incendies générés par un accident sur une activité voisine de l'éolienne.

4.3.2. Activités voisines

Aucune installation SEVESO, aucune installation nucléaire de base et aucune ICPE soumise à autorisation n'ont été référencées dans la zone d'implantation potentielle des éoliennes (minimum de 500 mètres des éoliennes). L'implantation du parc éolien du Plateau de Haution respecte ainsi les distances minimales réglementaires fixées par l'article 3 de l'arrêté du 26 août 2011.

4.3.3. Voies de communication

4.3.3.1. Couloir aérien

Le risque est limité par les distances de sécurité des éoliennes aux aérodromes retenues lors de l'étude d'implantation (l'aérodrome le plus proche se situe à 35 km) et par l'utilisation du balisage diurne et nocturne réglementaire.

Les servitudes sont étudiées dans le chapitre « Réseaux et Servitudes » de l'étude d'impact. Pour rappel, la Direction Générale de l'Aviation Civile et l'Armée de l'air ont été consultées et ont émis chacune un avis favorable à l'implantation du parc éolien du Plateau de Haution. Le parc éolien n'est concerné par aucune servitude aéronautique.

4.3.3.2. Voies routières

Les accidents de la route ne présentent pas de risques pour les éoliennes car ayant des effets limités en terme de distance. La première route (entre La Vallée au Blé et Haution) se situe à environ 180 m de l'éolienne la plus proche E6.

4.3.4. Réseaux

Le parc éolien du Plateau de Haution ne comporte aucun réseau d'alimentation en eau potable, ni aucun réseau d'assainissement. De même, les éoliennes ne sont reliées à aucun réseau de gaz.

Par ailleurs, il n'y a aucun réseau de gaz dans l'aire d'étude immédiate du parc.

Un réseau d'eau potable longe la route départementale RD960, au-delà du périmètre d'étude de l'étude de dangers.

4.3.5. Risques naturels

Les risques naturels sont étudiés dans l'étude d'impact dans le chapitre « Etat initial - risques naturels ».

4.3.5.1. Foudre

La foudre est généralement liée à une **situation atmosphérique instable** permettant la formation de cumulo-nimbus, masse puissante de nuages sombres. Les cumulo-nimbus sont des lieux propices aux phénomènes orageux, générateurs de foudre.

La densité de foudroiement est faible selon la cartographie de l'étude d'impact. Cependant la hauteur des machines (pale+mât) de 179 m ainsi que leur implantation dans des zones dégagées augmentent considérablement le risque de foudroiement.

RISQUES	CAUSES ET ORIGINES
- Projection de pales (ou morceaux) ou explosion de la pale - Incendie	- Foudre sur une pale ou la nacelle.

4.3.5.2. Vents violents

Les sites d'implantation des éoliennes sont pour la plupart du temps exposés à des vents importants qui sont pris en compte dans le dimensionnement des éoliennes. Néanmoins l'expérience montre que, par vent important, des accidents peuvent survenir quand il y a des défauts dans les systèmes de sécurité.

RISQUES	CAUSES ET ORIGINES
- Effondrement suite à des vibrations importantes - Survitesse du rotor entraînant : - Incendie par phénomène d'échauffement - Projection de pales - Effondrement de l'éolienne	- Vents forts.

4.3.5.3. Formation de glace

Ce phénomène résulte d'une accréation de glace sur le bord d'attaque, sur l'intrados et sur le bord de fuite de la pale. Ce phénomène apparaît pour des températures négatives, avec présence d'humidité en phase liquide ou gazeuse qui cristallise suite au choc avec la pale. La vitesse de rotation de la pale augmente le phénomène d'accréation. Ces conditions se retrouvent dans des cas particuliers d'épisodes météorologiques ou dans des nuages où l'eau est en surfusion. La glace et la neige peuvent s'accumuler sur les parties statiques (nacelle ou pale à l'arrêt) pouvant entraîner des chutes de morceaux dans un périmètre rapproché.

La température moyenne varie de 2°C à 18°. Le risque d'accréation de glace les jours de gel existe, par les températures négatives et par l'importance du vent à hauteur du moyeu.

RISQUES	CAUSES ET ORIGINES
- Projection de glace, éolienne en marche	- Conditions météorologiques spécifiques
- Chute de glace, éolienne à l'arrêt	- Conditions météorologiques spécifiques, accumulation de la glace sur les pales ou la nacelle

4.3.5.4. Risque sismique

Le zonage sismique de la France, basé sur un découpage communal, a été modifié par le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010. Ces dispositions sont codifiées aux articles R. 563-1 à D. 568-8-1 du code de l'environnement.

Ainsi, la France est divisée en 5 zones de sismicité : 1 (très faible), 2 (faible), 3 (modéré), 4 (moyenne) et 5 (forte).

En vertu de l'article D. 563-8-1 du code de l'environnement les communes de **Haution, Voulpaix et La Vallée-au-Blé** sont classées en **zone de sismicité 1 - très faible**.

L'article L. 563-1 du code de l'environnement prévoit que, dans les zones particulièrement exposées à un risque sismique ou cyclonique, des règles particulières de construction parasismique ou para cyclonique peuvent être imposées aux équipements, bâtiments et installations.

A ce jour, seules sont adoptées les règles de constructions applicables aux « bâtiments » (arrêté du 22/10/2010, modifié par arrêté du 19/07/2011).

La réglementation n'impose donc aucune règle particulière de construction parasismique aux aérogénérateurs.

Concernant les **postes de livraison**, ce local étant classé en catégorie d'importance I (installation dont la défaillance ne présente qu'un risque minime pour les personnes ou l'activité économique) **ils n'entrent pas dans le champ d'application des règles de construction parasismique** de l'arrêté du 22/10/2010 applicables aux bâtiments.

4.3.5.5. Risque de mouvement de terrain

Les bases de données consultées indiquent des risques faibles pour les phénomènes de retrait et gonflement d'argile et absence de cavités souterraines. Le dossier départemental des risques majeurs de l'Aisne (DDRM 02) indique qu'aucune commune n'est concernée par le risque mouvement de terrain.

La consultation des arrêtés de catastrophes naturelles pour les aléas « mouvement de terrain » montre deux événements en 1984 sur les communes de Haution et Voulpaix et en 1999 pour les trois communes.

Les trois communes sont concernées par une sensibilité à l'aléa « remontée de nappe ». Plusieurs événements « inondations et coulée de boues » ont fait l'objet d'arrêtés de catastrophe naturelle de 19984 à 2011.

Le dossier départemental des risques majeurs signale que la commune de Voulpaix est concernée par un risque majeur de « coulée de boue ». Cette commune s'inscrit dans deux plans de prévention des risques inondation (PPRI) « par ruissellement et coulée de boue » et par « crue (débordement de cours d'eau) ».

Les éoliennes sont situées à une distance des cours d'eau les plus proches (à 1,5 km entre E1 et le ruisseau de Beaurepaire et 1,4 km entre E5 et le ruisseau d'Ambercy) qui limite les risques d'inondation par remontée de nappe. Cependant la nature du sol avec présence d'un horizon argileux semi perméable peut provoquer la formation de petites nappes d'eau de surface en période de pluie intense.

RISQUES	CAUSES ET ORIGINES
- Effondrement de l'éolienne	- Affaissements - Tassements - Phénomènes de gonflement-retrait d'argile - Glissements de terrain Les mouvements rapides et discontinus : • Effondrements • Ecoulements et chutes de blocs • Coulées boueuses

4.4. Réduction des potentiels de dangers à la source

Les choix du porteur de projet au cours de la conception du projet ont pour objectifs de réduire les potentiels de danger identifiés et garantir une sécurité optimale de l'installation.

Parmi les raisons du choix du site du Plateau de Haution en faveur de la réduction des potentiels de dangers, on compte notamment l'absence de servitudes environnementales ou réglementaires réhabilitaires et la distances entre les installations et les enjeux à protéger.

Les mesures de réduction à la source des potentiels de dangers (choix du matériel certifié, maintenance des équipements, formation du personnel...) permettent autant que possible de réduire les risques.

Les potentiels de dangers associés aux phénomènes extérieurs au site (formation de givre et circulation routière) ne sont pas maîtrisables par le maître d'ouvrage. Dès lors une réduction à la source de ces potentiels n'est pas possible.

5. Analyse des retours d'expérience

L'objectif de ce chapitre de l'étude de dangers est de rappeler les différents incidents et accidents qui sont survenus dans la filière éolienne, afin d'en faire une synthèse en vue de l'analyse des risques pour l'installation et d'en tirer des enseignements pour une meilleure maîtrise du risque dans les parcs éoliens.

5.1. Bases de données consultées

L'accidentologie relatée ci-après résulte de la consultation principalement de :

La base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles - Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire) qui recense et analyse les accidents et incidents, survenus en France ou à l'étranger, depuis le 1er janvier 1992 (date de création du BARPI). Les événements les plus graves qui ont pu se produire avant 1992 sont également répertoriés (6% des accidents français ou étrangers recensés dans ARIA sont antérieurs à 1988).

L'accidentologie issue du *Guide INERIS / SER FEE*, recense des incidents liés aux parcs éoliens en France, sur la base des informations suivantes :

- rapport du Conseil Général des Mines (juillet 2004),
- base de données ARIA,
- communiqués de presse du SER - FEE et/ou des exploitants éoliens,
- site Internet de l'association « Vent de Colère » (anti-éolien),
- site Internet de l'association « Fédération Environnement Durable » (anti-éolien),
- articles de presse divers,
- données diverses fournies par les exploitants de parcs éoliens en France.

Ce chapitre fournit également, dans sa deuxième partie des indications qualitatives sur les typologies d'accidents ayant affectés des parcs éoliens dans le reste du monde. Il apparaît impossible aujourd'hui d'effectuer un recensement exhaustif à l'échelle internationale, en raison notamment du grand nombre de parcs installés et du manque de retours d'expérience dans certains pays.

5.2. Inventaire des accidents et incidents en France

L'inventaire des incidents et accidents en France se base sur le retour d'expérience de la filière éolienne à décembre 2011 (cf. Annexe 2 retour d'expérience).

En 2012, deux incidents sont survenus :

- le premier en janvier, sur le parc de Widehem (sur la côte d'Opale près de Boulogne sur Mer) où les pales d'une éolienne se sont désolidarisées suite à des vitesses de vent trop importantes. Il s'agit d'éolienne JS48 de Jeumont (groupe AREVA). Ce sont des machines d'ancienne génération sans système de freins aérodynamique de type pitch installées en 2001.
- Le second en mai, sur le parc du Chemin d'Ablis (en Eure-et-Loir) où une pale de 46 mètres s'est décrochée. L'éolienne était à l'arrêt pour cause de vent violent ; ce décrochage reste inexplicable pour le fabricant Repower qui n'a jamais connu de tels précédents.

Les accidents et incidents survenus en France pour cette activité (production d'électricité à partir de l'énergie du vent) sont répertoriés et décrits dans les bases citées précédemment. Les recherches effectuées dans ces bases ont porté sur les éoliennes. Les informations présentes dans les comptes rendus nous permettent ainsi de connaître les causes (événements initiateurs), les circonstances (événements indésirables ou courants), les

conséquences (événements redoutés secondaires et effets majeurs) et les mesures prises à court ou à moyen terme (des barrières de protection et de préventions).

Les résultats obtenus sont reproduits dans le tableau qui suit. On notera que les chiffres présentés ci-après ne sont que des estimations en un instant "t" qui ne doivent servir qu'à estimer les principaux aléas technologiques, sans pouvoir quantifier l'intensité des effets d'un phénomène dangereux.

Globalement, 33 incidents sont répertoriés entre 1992 et mai 2012 par le BARPI et les autres sources de données concernant des installations de production d'électricité à partir de l'énergie du vent (parc éolien).

Type d'incident	Nombre	Causes
Dégât sur les pales	3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Endommagement du dispositif d'arrêt automatique des pales suite à des coupures de courant dues à des vents de tempête ▪ choc entre l'aile d'un petit avion et une pale d'éolienne à l'arrêt du à une mauvaise météo, des conditions de vol difficiles et faute de pilotage (altitude trop basse sous le plafond imposé par le survol de la zone) ▪ Coup de foudre sur la pale
Projection / chute de pales	13	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempête ▪ Dysfonctionnement du système de freinage ▪ Survitesse ▪ Allongement des pales et retrait de sécurité (débridage) ▪ Suite à une opération de maintenance ▪ Foudre + défaut de pale
Chute d'un élément de la nacelle	1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Défaut au niveau des charnières de la trappe de visite. ▪ Correctif appliqué et changement des boulons de charnières effectué sur toutes les machines en exploitation
Chute/pliage du mât	4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arrachement de la fondation ▪ Tempête ▪ Dysfonctionnement du système de freinage ▪ Survitesse endommageant le rotor, puis une pale a pris le vent créant un balourd, puis le sommet de la tour a plié, buté contre la base entraînant la chute de l'ensemble.

Type d'incident	Nombre	Causes
Projection / chute de pales, puis chute/ pliage du mât	2	<ul style="list-style-type: none"> Tempête Foudre répétée
chute/ pliage du mât entraînant la projection de pale	1	<ul style="list-style-type: none"> Défaut de serrage des boulons servant à relier 2 tronçons du mât (défaillance d'entretien) et tempête
Électrisation des techniciens (avec brûlures)	2	<ul style="list-style-type: none"> Arc électrique du au contact entre un outil (mètre) et l'intérieur d'un transformateur en tension. Explosion d'un convertisseur, lors d'une opération de maintenance
Incendie	5	<ul style="list-style-type: none"> Acte de malveillance Problème au niveau d'éléments électroniques Court-circuit dans le transformateur dans la nacelle Court-circuit faisant suite à une opération de maintenance Lors d'une opération de maintenance, problème de régulation (freinage impossible) entraînant une survitesse
Projection / chute de pales et incendie	1	<ul style="list-style-type: none"> Lors d'une opération de maintenance, problème de régulation et dysfonctionnement du dispositif de freinage entraînant une survitesse
Total	33	

On notera que la projection de glace est un événement qui n'a jamais été recensé dans les parcs éoliens en France.

Par contre, 3 types d'incidents principaux se dégagent de l'inventaire des accidents :

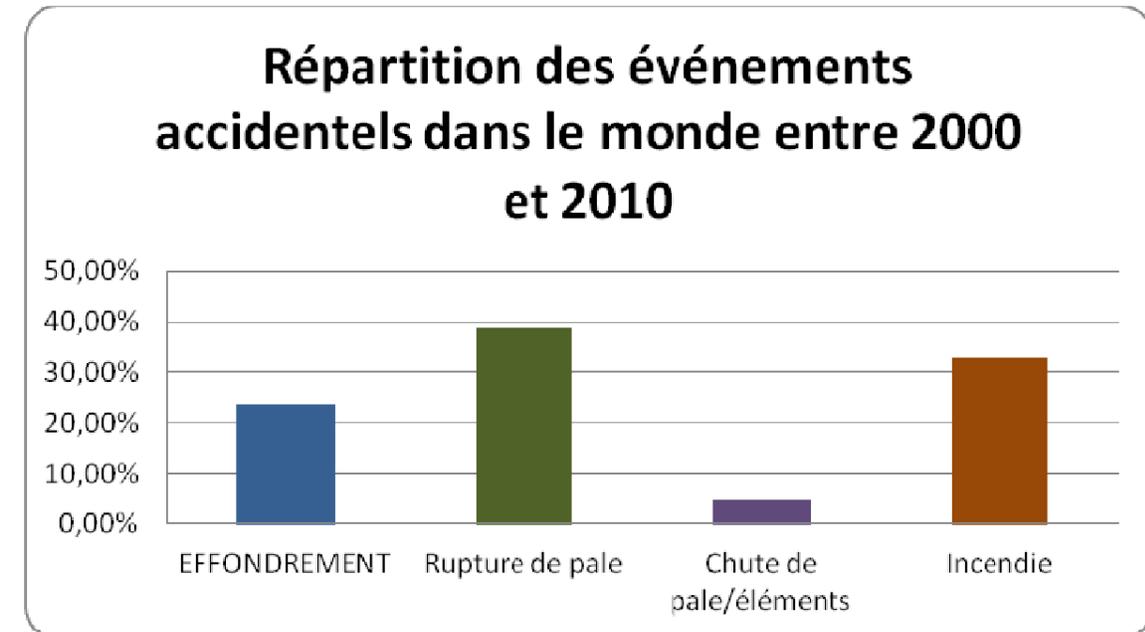
- les chutes, projection ou pliage, voire simples dégâts (23) : de pales (17) ou de mâts (4) ou les deux (3) ;
- l'incendie (6) : du à des problèmes électriques (3), des opérations de maintenance (2) ou de la malveillance (1) ;
- l'électrisation (2) : uniquement pendant les opérations de maintenance.

Cet inventaire permet de mettre en évidence que ce sont les chutes de pales et de mâts (ou projection et pliage) qui représentent la probabilité d'occurrence la plus importante (24 incidents sur 33, soit plus de 70 %).

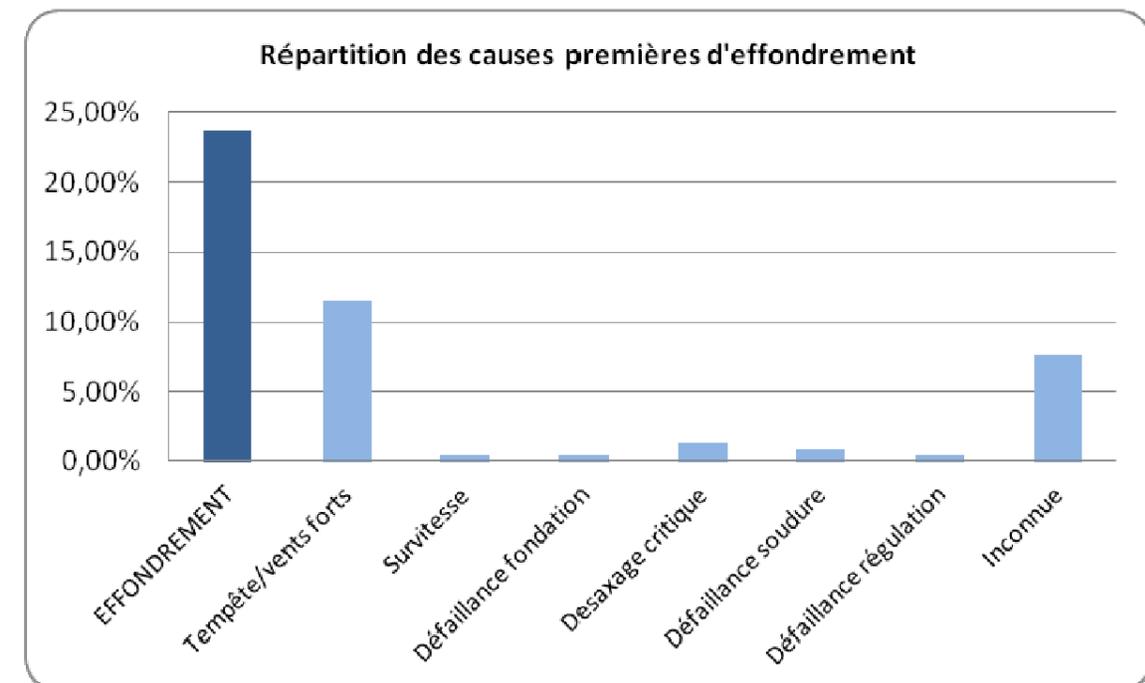
5.3. Inventaire des accidents et incidents à l'international

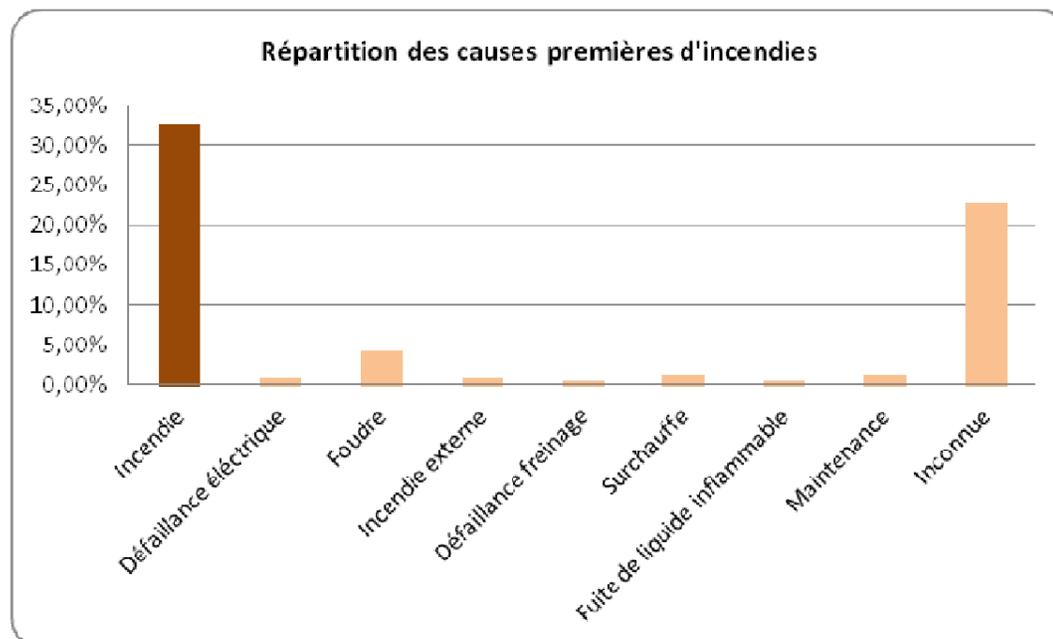
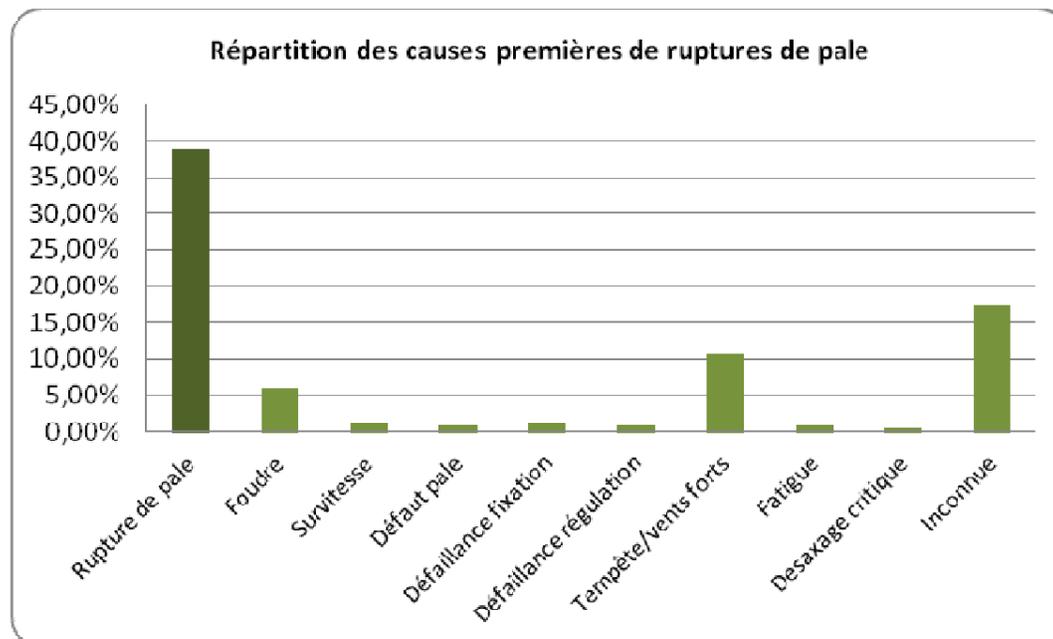
La synthèse ci-dessous provient de l'analyse de 236 accidents dans le monde issus des descriptions de 994 accidents proposés par le CWIF : sur les 994 accidents, seuls 236 sont considérés comme des « accidents majeurs » - les autres concernant plutôt des accidents du travail, des presque-accidents, des incidents, etc.

Le graphique suivant montre la répartition des événements accidentels par rapport à la totalité des accidents analysés.



Ci-après, est présenté le recensement des causes premières pour chacun des événements accidentels recensés (données en répartition par rapport à la totalité des accidents analysés).





Tout comme pour le retour d'expérience français, ce retour d'expérience montre l'importance des causes « tempêtes et vents forts » dans les accidents. Il souligne également le rôle de la foudre dans les accidents.

5.4. Synthèse des phénomènes dangereux redoutés issus du retour d'expérience

Le retour d'expérience de la filière éolienne française et internationale permet d'identifier les principaux événements redoutés suivants :

- Effondrements ;
- Ruptures de pales ;
- Chutes de pales et d'éléments de l'éolienne ;
- Incendie.

6. Analyse préliminaire des risques

6.1. Objectif de l'analyse préliminaire des risques

Ce chapitre est conforme à la réglementation liée aux risques des installations classées pour la protection de l'environnement :

- L'article L512-1 du code de l'environnement précise que « le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation. En tant que de besoin, cette étude donne lieu à une analyse de risques qui prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite ».
- A l'arrêté du 29/09/05 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation

L'analyse préliminaire des risques étudiera l'ensemble des accidents pouvant avoir un effet en dehors des limites de l'établissement.

L'objectif de cette partie est également de hiérarchiser les potentiels de dangers en tenant compte des retours d'expérience. Elle permettra ainsi d'attribuer une note de criticité à chaque risque recensé. A la manière d'un « entonnoir », cette partie doit permettre de retenir les scénarii d'accidents les plus critiques et qui feront l'objet d'une analyse détaillée et d'une modélisation des effets.

6.2. Méthodologie

La méthodologie employée s'inspire des méthodes existantes en termes d'évaluation des risques. Elle se base notamment sur l'Analyse Préliminaire des Risques, analyse appropriée à la complexité des équipements et couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception du projet.

Cette méthodologie est également complétée par certaines caractéristiques de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) en ce qui concerne l'évaluation quantitative des risques.

La méthode AMDEC prévoit en effet :

- une évaluation en terme de **probabilité** « P » : cet indice représente la probabilité que la cause se produise et qu'elle entraîne le mode de défaillance ;
- une évaluation en terme de **gravité** « G » : la gravité d'une défaillance se définit par le niveau des conséquences engendrées par la défaillance.

Cette évaluation se fait sur la base de l'analyse des retours d'expériences (retour d'expérience de la société, bibliographie, et consultation des bases de données existantes).

Enfin, un critère supplémentaire relatif à la **cinétique** « C » du déroulement du phénomène a été intégré dans la méthodologie.

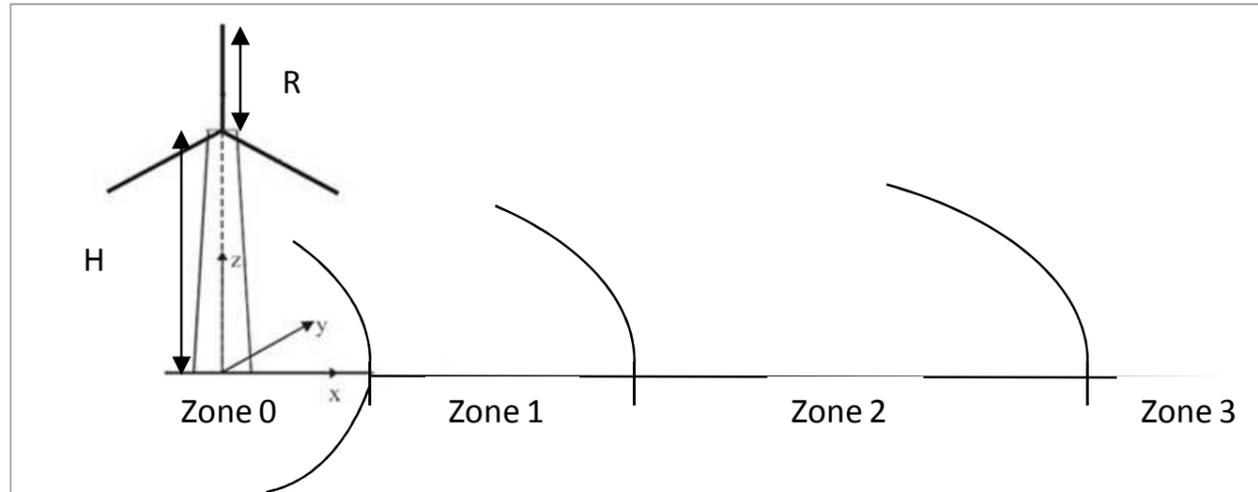
La cotation est rendue possible par le calcul de la criticité résultant de la combinaison de ces 3 facteurs soit probabilité, gravité et cinétique.

Concrètement, l'application de cette méthode repose sur le renseignement du tableau suivant :

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (⊕ Phénomène / ⊖ Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (⊕ Prévention / ⊖ Protection)	P	G	C	Commentaires
----	---------------------	--------	---	---	---	---	---	--------------

6.3. Définition de périmètres liés aux dangers

Dans le cadre des parcs éoliens, les périmètres liés aux dangers sont définis à l'extérieur des éoliennes puisque celles-ci sont fermées à clefs.



Périmètres autour de l'éolienne

Avec, dans le cas du modèle d'éolienne SIEMENS SWT113 : H = hauteur du moyeu = 122,5 mètres ; R = longueur d'une pale = 55,5 mètres

Zone 0, périmètre immédiat : Zone au pied de l'éolienne sous l'emprise des pales.

- Zone de risque de chutes ou projection d'objets : morceau de pales, pale complète, rotor avec pales, nacelle, glace ;
- Zone de risque de ruine de l'éolienne complète.
- Zone de risque de flux thermique
- Zone de risque de pollution par déversement de liquides

La zone 0 peut être assimilée au périmètre correspondant à un disque de rayon de la longueur d'une pale, soit 55,5 mètres.

Zone 1, périmètre proche :

- Zone de risque de chutes ou projection d'objets : morceau de pales, pales, glace ;
- Zone de risque de ruine de l'éolienne complète.

La zone 1 correspond au périmètre d'un disque de rayon de la longueur $H+R = 179$ mètres

Zone 2, périmètre de projection :

- Zone de risque de projection d'objets : morceau de pales, pales, glace.

La zone 2 correspond au périmètre de risque déterminé dans l'étude balistique (cf. annexe 3). Elle est de 399 mètres (risque de projection de fragments ou glace de la pale).

Zone 3, zone lointaine : Pas de risques.

6.4. Grille de cotation

L'évaluation quantitative est basée sur les échelles de gravité/ probabilité et cinétique. Elle est basée sur les méthodes et données disponibles :

- des annexes I et III de l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation ;
- des grilles proposées par les études INERIS notamment le guide Oméga 9 « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs, l'étude de dangers d'une installation classée » ;
- la circulaire du 10/05/2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003. Cette circulaire a vocation à traiter principalement des établissements relevant du régime de l'autorisation avec servitudes mais les principales règles méthodologiques peuvent être appliquées, avec la proportionnalité à laquelle la réglementation incite, pour l'ensemble des installations classées.

6.4.1. Gravité

Selon l'article 9 de l'arrêté du 29/09/05, l'intensité des effets des phénomènes dangereux est définie par rapport à des valeurs de référence exprimées sous forme de seuils d'effets toxiques, d'effets de surpression, d'effets thermiques et d'effets liés à l'impact d'un projectile, pour les hommes et les structures.

La gravité des conséquences potentielles prévisibles d'un accident sur les personnes physiques, résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de la vulnérabilité des personnes potentiellement exposées à ces effets, en tenant compte, le cas échéant, des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et de la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'accident si la cinétique de l'accident le permet.

L'échelle de gravité ne considère que les dommages causés aux personnes à l'extérieur de l'installation ICPE.

L'échelle de gravité employée, est issue de l'annexe III de l'arrêté du 29 septembre 2005 :

Niveau de gravité	Gravité des conséquences humaines	Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine	
G5	Désastreux	Plus de 10 personnes exposées (1)	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1000 personnes exposées	
G4	Catastrophique	Moins de 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées	Entre 100 et 1000 personnes exposées	
G3	Important	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées	
G2	Sérieux	Aucune personne exposée	Au plus 1 personne exposée	Moins de 10 personnes exposées	
G1	Modéré	Pas de zone de létalité hors de l'établissement			Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « 1 personne »

(1) Personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

Evaluation de la gravité des conséquences humaines

Nota : la gravité est évaluée en tenant compte des barrières de protection mises en place.

On considère qu'une personne exposée dans le cadre d'un phénomène de projection ou d'effondrement sera considérée comme exposée à un effet léthal.

Concernant l'incendie, étant donné que les principaux produits combustibles se situent dans la nacelle, le risque thermique et le risque lié au panache de fumée se situe à hauteur de nacelle. Vu la hauteur de celle-ci et du fait de la charge combustible limitée, le risque pour les populations est faible.

Pour les phénomènes qui risquent d'avoir une incidence sur l'environnement, l'échelle de gravité utilisée est inspirée du guide Oméga 7 - "Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle" - INERIS - Mai 2003.

Niveau de gravité	Cibles environnementales
E5	⇒ Atteintes critiques, vis-à-vis de zones vulnérables (ZNIEFF, points de captages...) avec des répercussions à l'échelle locale
E4	⇒ Atteintes sérieuses à l'environnement limitées au périmètre proche Ou ⇒ Atteintes limitées dans un périmètre éloigné
E3	⇒ Atteintes limitées au périmètre proche et conséquences limitées
E2	⇒ Atteintes limitées au périmètre rapproché et conséquences limitées
E1	⇒ Aucun impact environnemental

Grille de cotation en gravité pour les cibles environnementales

6.4.2. Probabilité

Selon l'article 2 de cet arrêté : « Les probabilités d'occurrence des phénomènes dangereux et des accidents potentiels identifiés dans les études de dangers des installations classées doivent être examinées. En première approche, la probabilité d'un accident majeur peut être assimilée à celle du phénomène dangereux associé ».

L'échelle de probabilité a été définie conformément à l'article 3 de l'arrêté du 29 septembre 2005 : « La probabilité peut être déterminée selon trois types de méthodes : de type qualitatif, semi-quantitatif ou quantitatif. Ces méthodes permettent d'inscrire les phénomènes dangereux et accidents potentiels sur l'échelle de probabilité à cinq classes définie en annexe 1 du présent arrêté ». Le type d'appréciation choisi est l'approche quantitative pour les risques dont les données de défaillance sont disponibles dans l'accidentologie.

Niveau d'occurrence	Probabilité	Traduction qualitative
A	$10^{-2} < P$	Evènement très probable (courant) : S'est déjà produit plusieurs fois sur le site ou de nombreuses fois sur d'autres sites
B	$10^{-2} < P < 10^{-3}$	Evènement probable : S'est déjà produit au moins une fois sur le site, plusieurs fois sur d'autres sites
C	$10^{-3} < P < 10^{-4}$	Evènement improbable : Ne s'est jamais produit sur le site mais, quelquefois sur d'autres sites.
D	$10^{-4} < P < 10^{-5}$	Evènement très improbable : Ne s'est jamais produit sur le site, très rarement sur d'autres sites.
E	$P < 10^{-5}$	Evènement possible mais extrêmement peu probable : Ne s'est jamais produit sur le site, extrêmement rarement sur d'autres sites

Grille de cotation en probabilité d'occurrence

Nota : La probabilité est évaluée en tenant compte des barrières de prévention mises en place selon l'article 4 de l'arrêté du 29/09/2005, « les barrières peuvent être prises en compte dans la mesure où elles sont

efficaces, leur cinétique de mise en œuvre est en adéquation avec les événements à maîtriser et elles sont testées et maintenues dans le temps ».

6.4.3. Cinétique

L'article 6 de l'arrêté du 29/09/2005 précise que « les études de dangers fournissent des éléments de cinétique d'évolution des phénomènes dangereux et de propagation de leurs effets, tenant compte de la cinétique de mise en œuvre des mesures de sécurité, afin de permettre la planification et le choix des éventuelles mesures à prendre à l'extérieur du site ».

La cinétique de déroulement d'un accident est qualifiée de lente, dans son contexte, si elle permet la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes, dans le cadre d'un plan d'urgence externe, pour protéger les personnes exposées à l'extérieur des installations objet du plan d'urgence avant qu'elles ne soient atteintes par les effets du phénomène dangereux.

C'est pourquoi le scénario incendie sera classé comme cinétique lente (niveau de cinétique D) car les secours seront prévenus dans un délai rapide permettant une intervention protégeant les populations.

Niveau de cinétique	Apparition situation dangereuse	Evolution phénomène	Effets au niveau des cibles
A	Rapide	Rapide	Effets immédiats
B	Rapide	Rapide	Effets différés
C	Lente ou peu rapide	Rapide	Effets immédiats
D	Lente ou peu rapide	Rapide	Effets différés
E	Lente ou peu rapide	Lente ou peu rapide	-

Grille de cotation en cinétique

6.5. Risque inacceptable et risque critique : définitions

6.5.1. Grilles de criticité

Les références sont les deux grilles suivantes :

- la première grille, issue de la confrontation des échelles de **gravité et de probabilité**, permettra d'effectuer une **première hiérarchie des risques** ;
- La deuxième grille, issue de la confrontation des échelles de **gravité et de cinétique**, permettra de déterminer plus finement le **niveau de risque**, par combinaison avec la première grille.

Niveau de gravité						
G5 ou E5	G5-E	G5-D	G5-C	G5-B	G5-A	
G4 ou E4	G4-E	G4-D	G4-C	G4-B	G4-A	
G3 ou E3	G3-E	G3-D	G3-C	G3-B	G3-A	
G2 ou E2	G2-E	G2-D	G2-C	G2-B	G2-A	
G1 ou E1	G1-E	G1-D	G1-C	G1-B	G1-A	
	E	D	C	B	A	Niveau de Probabilité

Niveau de gravité						
G5 ou E5	G5-E	G5-D	G5-C	G5-B	G5-A	
G4 ou E4	G4-E	G4-D	G4-C	G4-B	G4-A	
G3 ou E3	G3-E	G3-D	G3-C	G3-B	G3-A	
G2 ou E2	G2-E	G2-D	G2-C	G2-B	G2-A	
G1 ou E1	G1-E	G1-D	G1-C	G1-B	G1-A	
	E	D	C	B	A	Niveau de cinétique

Grilles de criticité

6.5.2. Détermination du niveau de risque par combinaison des deux grilles

Couple Gravité - Probabilité	Couple Gravité - Cinétique	Niveau de risque	Action
		Inacceptable	Diminuer le risque et réévaluer
		Critique	Démarche d'amélioration continue
Autres combinaisons		Très faible à modéré	Pas de mesures nécessaires

Niveau de risque de l'événement non souhaité

6.5.3. Définitions des niveaux de risque

Risque inacceptable : Un risque inacceptable correspond à un événement dont la cotation gravité/ probabilité est repérée en trame rouge dans les grilles de criticité, quelle que soit sa cinétique. Il s'agit des événements de gravité élevée à l'origine d'effets létaux ou irréversibles.

Le risque est présumé trop important pour maintenir le projet en l'état. Il convient de modifier le projet de manière à réduire le risque (afin de sortir de la zone rouge).

Risque critique : Un risque critique correspond à un événement dont la cotation gravité/ probabilité est située dans la zone intermédiaire de la grille (zone tramée en orange).

Il s'agit :

- Soit des événements de gravité élevée, qualifiés d'improbables, mais de cinétique (assez) élevée.
- Soit des événements de gravité sérieuse, qualifiés de (très) probables, et de cinétique (assez) élevée.

↳ Des barrières complémentaires devront être mises en œuvre, quand bien même ces événements présentent une probabilité faible. Ces barrières doivent permettre d'atteindre un niveau de risque aussi bas que possible dans des conditions économiquement acceptables.

↳ Compte tenu de la gravité que pourrait engendrer ce genre de situation, un niveau de maîtrise optimal doit être maintenu (préconisations de tests périodiques) dans une démarche d'amélioration continue pour assurer les performances des barrières de prévention existantes.

6.6. Evaluation préliminaire des risques

Sur la base des éléments méthodologiques présentés au paragraphe précédent, les tableaux suivants font état :

- Des potentiels de dangers identifiés ;
- Des causes et conséquences associées ;
- De leur cotation de manière à aboutir à une possible hiérarchisation.

La cotation des potentiels de dangers est proposée sur la base des éléments décrits dans le dossier.

Poste de livraison

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
1	Inflammation du transformateur	a. Court-circuit b. Foudre c. Erreur humaine	① Incendie : flux thermique, émission de fumées ± toxique / ② Personnes, véhicules, équipements.	① a. Conformité aux normes en vigueur ① a. Contrôle annuel par un organisme agréé ② Capteurs d'incendie et alerte ② Local protégé contre le feu M1 ② Présence d'extincteurs + formation du personnel aux risques incendie	D	G1	D	Incendie limité aux postes de livraison. Pas d'effets significatifs sur les populations.
2	Déversement de l'huile du transformateur	a. Défaut d'étanchéité b. Erreur humaine	① Pollution / ② Sol & nappe phréatique	① a. Capteurs de niveaux d'huile ① b. Maintenance régulière ② Barrière du sol en béton	E	E1	D	Le volume d'huile est limité et le bâtiment posé sur une dalle béton étanche. Pas d'atteintes environnementales hors du bâtiment.

Fondation

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
3	Défaut de stabilité de la fondation entraînant ruine de l'éolienne	a. Défaut structurel de la fondation b. Erreur de dimensionnement c. Mouvements de terrains d. Inondation	① Ruine de l'éolienne ② Personnes, véhicules, équipements.	① a. b. Conformité aux normes en vigueur ① b. Personnel compétent ① b, c. Etude de sol ① d. Etude d'impact	D	G2	A	Le risque est limité à des zones agricoles ou la voie communale reliant Haution à Voulpaix. Présence rare de personne dans la zone d'effet.

Mât

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
4	Inflammation de l'armoire de contrôle	a. Court-circuit/arc électrique b. Défaillance matériel c. Foudre d. Erreur humaine	① Incendie : flux thermique, émission de fumées ± toxiques, effondrement de l'éolienne, chute d'éléments ② Personnes, véhicules, équipements.	① a, b. Conformité aux normes en vigueur ① a, b. Contrôle annuel par un organisme agréé ① a. Accès limité aux personnes habilitées ① a. Présence disjoncteur ① c. Paratonnerre ① d. Intervention de personnes compétentes, habilitées et formées ② Capteurs d'incendie et capteur d'arc électrique ② Présence d'extincteurs + formation du personnel d'intervention aux risques incendie	D	G1	D	Les effets du flux thermique sont limités autour de l'éolienne dans un périmètre où présence rare de personnes. Cinétique lente.
5	Rupture du mât entraînant ruine de	a. Défaut structurel de la tour	① Chute de l'éolienne	① a. c. Conformité aux normes en vigueur	D	G2	A	Le risque est limité à des zones agricoles ou la voie communale reliant Haution à

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
	l'éolienne	b. Impact de la pale sur la tour suite au vent violent c. Contraintes mécaniques limites dépassées d. Incendie e. Impact d'un aéronef f. Usure, corrosion g. Défaut de montage	② Personnes, véhicules, équipements.	① b. Systèmes de freinage ① e. signaux lumineux préventifs pour les aéronefs ① f. Maintenance régulière ① g. Personnel compétent				Voulpaix. Présence rare de personne dans la zone d'effet.

Nacelle

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
6	Inflammation de la nacelle	a. Court-circuit/arc électrique b. Défaillance matériel c. Foudre d. Erreur humaine	① Incendie : flux thermique, émission de fumées ± toxique, effondrement de l'éolienne, chute d'éléments ② Personnes, véhicules, équipements.	① a, b. Conformité aux normes en vigueur ① a, b. Contrôle annuel par un organisme agréé ① a, e. Accès limité aux personnes habilitées ① a. Présence disjoncteur ① c. Paratonnerre ① d. Intervention de personnes compétentes, habilitées et formées ② Capteurs d'incendie et capteur d'arc électrique ② Présence d'extincteurs + formation du personnel d'intervention aux risques incendie	D	G1	D	Les effets du flux thermique sont limités autour de la nacelle à une hauteur hors de portée de population. Cinétique lente.
7	Inflammation de la nacelle par échauffement des systèmes en rotation	a. Défaillance lubrification b. Défaut de refroidissement c. Survitesse	① Incendie : flux thermique, émission de fumées ± toxique, effondrement de l'éolienne, chute d'éléments ② Personnes, véhicules, équipements.	① a. b. c. Maintenance régulière ① a. b. Capteurs de température ① a. Capteurs niveaux d'huile ① b. Capteurs niveaux liquide de refroidissement ① c. Freins ② Capteurs d'incendie et alerte ② Présence d'extincteurs + formation du personnel aux risques incendie	D	G1	D	Les effets du flux thermique sont limités autour de la nacelle à une hauteur hors de portée de population. Cinétique lente.
8	Chute de la nacelle	a. Défaut de montage	① Chute de la nacelle	① a. Personnel compétent	D	G2	A	Le risque est limité à des zones agricoles.

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
		b. Usure, corrosion c. Défaut structurel d. Inflammation	② Personnes.	① b. Maintenance régulière ① c. Tests in situ ① c. Conformité aux normes en vigueur d. voir situations de danger n°6 et 7				Présence rare de personne dans la zone d'effet.
9	Déversement de liquide dans le sol	a. Défaut d'étanchéité b. Erreur humaine c. Incendie de la nacelle	① Pollution ② Sol & nappe phréatique	① a. Capteurs de niveaux d'huile ① b. Maintenance régulière ② Barrière de la nacelle (rétention).	E	E2	D	La zone de risque est comprise dans le périmètre immédiat de l'éolienne. Pas d'accidents recensés.

Pale et rotor

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
10	Eolienne à l'arrêt/ rupture et chute de pale	a. Impact d'un aéronef b. Défaut structurel de la pale ou l'attache c. Défaut de montage e. Foudre	① Chute de pale ② Personnes.	① a. signaux lumineux préventifs pour les aéronefs ① b. Conformité aux normes en vigueur de conception ① b. Maintenance régulière ① b. tests ① c. Personnel compétent ① e. Paratonnerre	D	G2	A	Présence rare de personnes dans la zone de risque (promeneur, agriculteur) car on considère que la pale tombera en plein champs agricole.
11	Projection de pale ou fragments	a. Impact d'un aéronef b. Défaut structurel de la pale ou l'attache c. Défaut de montage d. Survitesse e. Foudre	① Projection de pale ou fragments de pale ② Personnes, véhicules, bâtiment.	① a. signaux lumineux préventifs pour les aéronefs ① b. Conformité aux normes en vigueur ① b. tests ① c. Maintenance régulière ① d. Systèmes de freins aérodynamique ① e. Paratonnerre	D	G3	A	Des voies de circulation ou bâtiments peuvent se situer dans la zone de risque. Présences temporaire de plusieurs personnes dans cette zone.
12	Projection de pale complète sur une conduite de gaz entraînant rupture et risque d'incendie ou explosion	a. Impact d'un aéronef b. Défaut structurel de la pale ou l'attache c. Défaut de montage d. Survitesse e. Foudre	① Projection de pale complète sur une conduite de gaz enterrée ② Incendie/explosion provoqué par la fuite de gaz.	① a. signaux lumineux préventifs pour les aéronefs ① b. Conformité aux normes en vigueur ① b. tests ① c. Maintenance régulière ① d. Systèmes de freins aérodynamique ① e. Paratonnerre	-	-	-	Pas de réseaux dans le périmètre de risque de projection de pale (soit 180m) pouvant entraîner un effet domino par rupture de la canalisation.
13	Chute du rotor	a. Défaut de montage b. Usure, corrosion c. Défaut structurel	① Chute du rotor ② Personnes.	① a. Personnel compétent ① b. Maintenance régulière ① c. tests in situ ① c. Conformité aux normes en vigueur	D	G2	A	Présence rare de personnes dans la zone de risque (promeneur, agriculteur) car on considère que la pale tombera en plein champs agricole.
14	Eolienne à l'arrêt/ chute de glace	a. condition météo spécifique à la formation de glace : températures	① Projection de glace	① a. Affichage des risques à proximité de l'éolienne	C	G1	B	Périmètre de risque se situant en zone

N°	Situation de danger	Causes	Conséquences (① Phénomène / ② Cibles atteintes)	Barrières de sécurité (① Prévention / ② Protection)	P	G	C	Commentaires
		negatives, humidité, etc.	② Personnes, véhicule.					agricole.
15	Projection de glace	a. condition météo spécifique à la formation de glace : températures négatives, humidité, etc.	① Projection de glace ② Personnes, véhicule.	① a. Capteurs de température ① a. Détecteur de vibration ① a. Affichage des risques à proximité de l'éolienne	D	G2	B	Projection pouvant atteindre des voies de circulation. Le détecteur de vibration permet d'éviter que les morceaux atteignent une taille importante. Présence rare de personne dans la zone de risque.

Conclusions

L'évaluation détaillée au paragraphe précédent amène aux résultats suivants :

N°	Élément concerné	Situation de danger	Couple G - P	Couple G - C	Niveau de risque	Scénario retenu pour l'étude détaillée ?
1	Poste de livraison	Inflammation du transformateur	G1-D	G1-D	Très faible à modéré	Non
2		Déversement de l'huile du transformateur	E1-E	E1-D	Très faible à modéré	Non
3	Fondation	Défaut de stabilité de la fondation entraînant ruine de l'éolienne	G2-D	G2-A	Très faible à modéré	Non
4	Mât	Inflammation de l'armoire de contrôle	G1-D	G1-D	Très faible à modéré	Non
5		Rupture du mât entraînant ruine de l'éolienne	G2-D	G2-A	Très faible à modéré	Non
6	Nacelle	Inflammation de la nacelle	G1-D	G1-D	Très faible à modéré	Non
7		Inflammation de la nacelle par échauffement des systèmes en rotation	G1-D	G1-D	Très faible à modéré	Non
8		Chute de la nacelle	G2-D	G2-A	Très faible à modéré	Non
9		Déversement de liquide dans le sol.	E2-E	E2-D	Très faible à modéré	Non
10	Pales ou rotor	Eolienne à l'arrêt/ rupture et chute de pale	G2-D	G2-A	Très faible à modéré	Non
11		Projection de pale ou fragments	G3-D	G3-A	Critique	Oui
12		Projection de pale complète sur une conduite de gaz pouvant entraîner rupture et risque d'incendie ou d'explosion	-	-	-	-
13		Chute du rotor	G2-D	G2-A	Très faible à modéré	Non
14		Eolienne à l'arrêt/ chute de glace	G1-C	G1-B	Très faible à modéré	Non
15	Projection de glace	G2-D	G2-B	Très faible à modéré	Non	

6.7. Effets dominos

Lors d'un accident majeur sur une éolienne, une possibilité est que les effets de cet accident endommagent d'autres installations. Ces dommages peuvent conduire à un autre accident. Par exemple, la projection de pale impactant les canalisations d'une usine à proximité peut conduire à des fuites de canalisations de substances dangereuses. Ce phénomène est appelé « effet domino ».

Les effets dominos susceptibles d'impacter les éoliennes sont décrits dans le tableau d'analyse des risques générique présenté ci-dessus.

En ce qui concerne les accidents sur des aérogénérateurs qui conduiraient à des effets dominos sur d'autres installations, le paragraphe 1.2.2 de la circulaire du 10 mai 2010 précise : « [...] seuls les effets dominos générés par les fragments sur des installations et équipements proches ont vocation à être pris en compte dans les études de dangers [...]. Pour les effets de projection à une distance plus lointaine, l'état des connaissances scientifiques ne permet pas de disposer de prédictions suffisamment précises et crédibles de la description des phénomènes pour déterminer l'action publique ».

6.8. Conclusion de l'analyse préliminaire des risques

La situation de dangers n° 11 « Projection de pales ou fragments » ressort comme critique, c'est pourquoi cette situation de danger a été développée dans l'analyse détaillée des risques afin de déterminer les zones d'effets associées et calculer l'indice de risque pour les cibles identifiées.

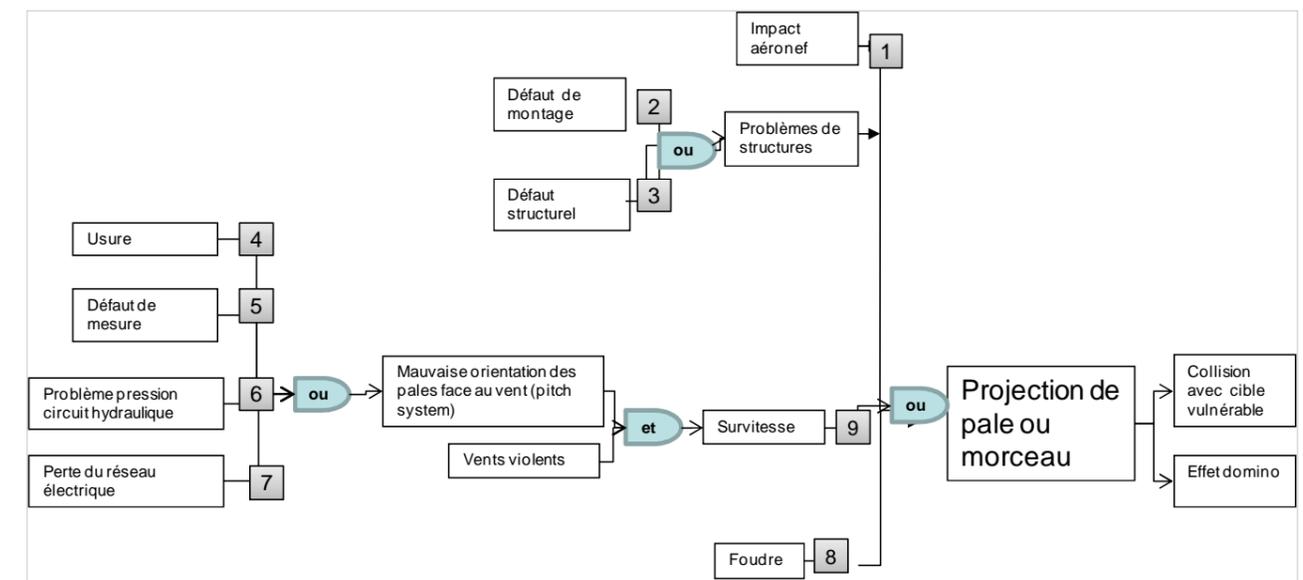
7. Etude détaillée des risques

7.1. Analyse des causes et mesures de maîtrise des risques

Le scénario « Projection de pales ou fragments » a été coté dans l'analyse préliminaire des risques comme un scénario critique. Celui-ci fait donc l'objet d'une analyse détaillée afin de déterminer les risques dans le contexte de l'implantation retenue du parc éolien.

Une démarche itérative de réduction des risques à la source sera menée à bien. Si cette démarche faisait apparaître de nouveaux scénarios qui n'auraient pas été identifiés dans la phase préalable, ceux-ci seraient alors réintroduits dans le processus d'analyse des risques.

L'arbre des causes ci-dessous décrit le mécanisme d'apparition de la situation de danger :



Arbre de défaillance pour le scénario de projection de pale

Les barrières de sécurité ainsi que les moyens humains mis en place par l'exploitant afin de diminuer la probabilité d'apparition de cette situation sont les suivantes :

1. Balisage au dessus de la nacelle pour avertir les aéronefs ;
2. Personnel qualifié et formé ;
3. Conformité des machines à la norme IEC 61400 et essais en usine et in situ ;
4. Maintenance régulière avec vérification des équipements, structures et procédures ;
5. Détecteurs redondants : vitesse vent, vitesse rotation ;
6. Mesure de la pression du circuit hydraulique ;
7. Accumulateur de pression hydraulique pour mise en drapeau d'urgence ;
8. Paratonnerre et conducteur métallique dans les pales ;
9. Système de freinage aérodynamique.

Les barrières de prévention ou de protection auront été jugées comme étant en adéquation avec la cinétique du phénomène, si leur temps de déclenchement et de mise en œuvre est inférieur à la cinétique du phénomène.

7.2. Evaluation du risque selon la méthode du calcul de l'indice de risque

7.2.1. Méthodologie

Par manque de référentiel technique et officiel sur l'évaluation du risque de projection de fragment ou pale, l'évaluation a été basée sur une méthode extraite du rapport : *Handbook Risicozonering Windturbines*, version Janvier 2005 (appelé rapport du NOVEM).

Cette méthode ne suit pas les règles de la circulaire du 10/05/2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003. Cependant elle a également servi d'inspiration pour évaluer le nombre de personne exposée dans une zone d'effet.

Cette méthode d'évaluation quantitative des risques individuels et sociétaux appelée QRA (Quantitative Risk Assessment) afin de vérifier que le niveau de risque est acceptable pour toutes les cibles identifiées dans les zones de risques autour des éoliennes. Pour évaluer le niveau d'acceptabilité, le niveau de risque fixé par le *Netherlands ministry of spatial planning housing and the environment* est de 10^{-6} .

On cherchera à calculer la probabilité d'impact à chaque instant entre un objet projeté sur une cible vulnérable. Ce risque est la probabilité d'impact P_i qui prend en compte le risque lié à plusieurs éoliennes selon le scénario de projection.

On supposera que les personnes exposées dans la zone d'impact subissent des effets létaux significatifs. L'indice de risque peut donc être ainsi assimilé à la probabilité de collision entre un objet projeté et une personne.

Pour que le risque soit considéré comme acceptable, la probabilité P_i devra être inférieure à 10^{-6} .

Pour les linéaires (voies de circulation) on ne retiendra l'indice de risque que sur des points déterminés. On cherchera en général le point le plus proche du danger afin de surestimer le risque.

$$P_i = P_{\text{collision}} * P_{\text{présence}} \quad \text{formule (1)}$$

$$P_{\text{collision}} = P_{\text{défaillance}} * P_{\text{trajectoire}}$$

i scénario : projection débris, projection pale complète

- P_i Probabilité d'impact d'un objet sur une personne (indice de risque pour le scénario i)
- $P_{\text{collision}}$ Probabilité qu'une pale ou un fragment soit projeté en (x,y) ;
- $P_{\text{défaillance}}$ Probabilité de défaillance de l'aérogénérateur entraînant le scénario redouté de projection ;
- $P_{\text{trajectoire}}$ Probabilité de projection en (x,y) en cas de défaillance. Cette probabilité est donnée par l'étude balistique ;
- $P_{\text{présence}}$ est la probabilité de présence d'une cible vulnérable (personnes) dans la zone d'impact :

$$P_{\text{présence}} = d * S_{\text{impact}}$$

- S_{impact} est la surface de la zone d'impact autour du point de chute (x,y). Plus l'objet projeté est grand, plus la zone d'effet sera importante avec augmentation du risque.
- d est la densité de personnes permanentes (pers/m²)

On considère que les événements « projection d'objet » et « présence de la cible » sont des événements indépendants. Pourtant il est vraisemblable en cas de vents importants, qu'aucune personne ne se promène à proximité de l'éolienne. Or le risque de bris de pale est bien lié à la force du vent. Le risque est donc surestimé.

Les barrières de sécurité mises en œuvre sont jugées suffisantes, pour limiter les causes d'apparition du phénomène dangereux.

7.2.1. Identification de cibles

La circulaire du 10/05/2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers et le guide du NOVEM ont servi de base pour identifier les cibles.

Ont été retenues les cibles vulnérables qui se situeraient dans le périmètre de risque et dont la gravité de la collision entraînerait au minimum un décès.

Ces cibles vulnérables sont des lieux pouvant comporter de manière occasionnelle ou permanente des personnes.

Les cibles recherchées dans les périmètres de risque seront les suivantes :

- Zone agricole (risque pour l'agriculteur) ;
- Les bâtiments fréquentés (habitations, ERP, usines) ;
- Les voies de circulation (départementales, nationales et autoroutes) ;
- Les lieux fréquentés (étang de pêche, lieu de baignade, etc.) ;
- Les chemins de randonnée (GR : Grande Randonnée) ;
- Les réseaux enterrés de gaz (en tant qu'équipement pouvant entraîner un effet domino).

On retiendra l'agriculteur comme une cible vulnérable étant donné que les éoliennes sont implantées dans des zones agricoles. On calculera l'indice de risque en un seul point du champ et on retiendra une distance éolienne/agriculteur proche afin de surestimer le risque.

Les voies de circulation ne sont considérées comme des cibles que si elles sont empruntées par un nombre significatif de personnes (*Fiche 1, circulaire du 10/05/2010*). Ainsi, on ne retiendra que les routes dont on peut disposer d'une fréquentation : départementales, nationales et autoroutes.

De la même manière, on ne retiendra que les chemins de randonnées ayant une fréquentation importante (GR).

On ne modélisera pas la collision entre une pale (ou un débris) avec une autre éolienne du parc ou d'un parc voisin. En effet cette collision peut entraîner des dégâts variables. Dans le cas où les dégâts seraient importants entraînant notamment la projection de pales par effet domino, ce scénario serait étudié car le risque est évalué pour chaque machine.

7.2.2. Probabilité de défaillance d'une éolienne $P_{\text{défaillance}}$

Nous disposons actuellement de statistiques de défaillance compilées par le NOVEM.

Défaillance	Probabilité $P_{\text{défaillance}}$
Projection pale complète	$8,4 * 10^{-4}$
A vitesse nominale	$4,2 * 10^{-4}$
En vitesse de freinage	$4,2 * 10^{-4}$
En survitesse	$5,0 * 10^{-6}$
Projection fragment de pale	$2,6 * 10^{-4}$

Probabilités de défaillance

La technologie des machines ayant évolué depuis 2001 avec des dispositifs de sécurité renforcés, on peut considérer que ces données surévaluent le risque.

7.2.3. Probabilité d'impact sur une zone $P_{\text{trajectoire}}$

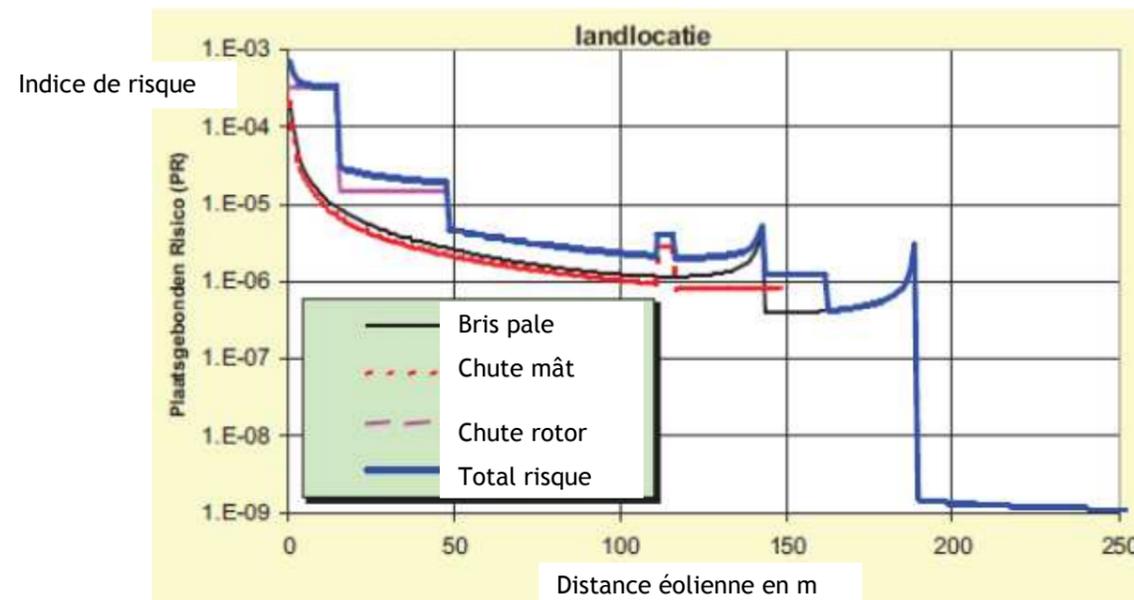
Le détail du calcul de la modélisation balistique permet pour chaque scénario analysé (vitesse de rotation, taille de l'objet) de déterminer les distances de projection maximale (cf. Annexe 5: Etude balistique de la machine SIEMENS SWT113).

$P_{\text{trajectoire}}$ n'est pas connu étant donné le manque de données statistiques de modélisations balistiques avec cette machine.

7.2.4. Probabilité d'impact $P_{\text{collision}}$

En l'absence de données sur $P_{\text{trajectoire}}$, entrant dans la formule $P_{\text{collision}} = P_{\text{défaillance}} * P_{\text{trajectoire}}$, nous nous baserons sur les valeurs du guide du NOVEM pour évaluer $P_{\text{collision}}$.

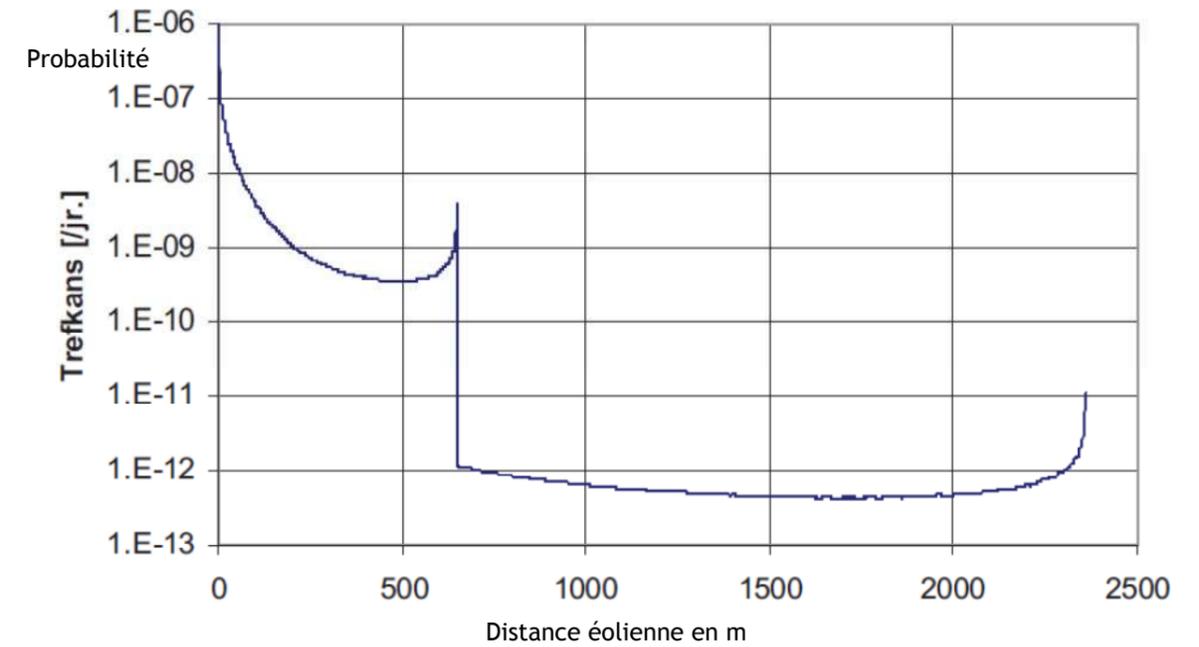
7.2.5. Scénario projection de pale complète



Graphique de la probabilité de collision pour une machine de 3MW

$P_{\text{collision}}$ sera évaluée par une lecture graphique ci-dessus en fonction de la distance de la cible pour le scénario de projection de pale complète. Cette machine de 3MW a été choisie en fonction de la hauteur de mât (113,3 m) et de la vitesse de rotation nominale (15,2 rpm) qui correspondent le mieux à la SIEMENS SWT-2,3-113 de 122,5 m de hauteur de mât.

7.2.6. Scénario projection d'un fragment de pale



Graphique de la probabilité de collision d'un débris pour une machine de 1,5MW

Sans disposer de données pour une machine similaire à celle de SIMENS, $P_{\text{collision}}$ sera évaluée par une lecture graphique ci-dessus en fonction de la distance de la cible pour le scénario de projection de fragments de pale.

7.2.7. Probabilité de présence d'une vulnérabilité $P_{\text{présence}}$

Cette probabilité traduit la présence de personnes dans la zone d'impact. On se basera sur la méthode exposée dans la circulaire du 10/05/2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers. Celle-ci se base sur le comptage de personnes exposées dans la zone d'effet. On supposera que les personnes exposées dans la zone d'impact subissent des effets létaux significatifs.

7.2.8. Evaluation de S_{impact}

L'évaluation de cette surface de la zone de dommages autour du point de chute (x,y) dépend de l'objet projeté ou en chute libre. On modélisera plusieurs cas de figures :

- Projection d'une pale complète (11,3 tonnes)
- Projection d'un fragment de pale de 110 kg d'une longueur de 2 mètres

Ces données sont issues des hypothèses retenues dans l'étude balistique. On retiendra la surface d'impact correspondant à la surface de l'objet qui atteint le sol. Comme les objets ont des formes complexes et que l'on ne sait pas prédire le mouvement de l'objet pendant sa trajectoire et son orientation au moment de son impact, on fera l'hypothèse majorante que la surface correspond au disque de rayon égal à la plus grande longueur de l'objet.

Scénario	Surface retenue	S_{impact}
Projection pale complète	Surface disque rayon = 55m	9 503 m ²
Projection morceau de pale	Surface du disque de rayon = 2m	12,6 m ²

Surfaces S_{impact} suivant les scénarii de projection

7.2.9. Evaluation de P_{présence} en fonction de la densité des personnes

▪ Terrains non bâtis

Terrains non aménagés et très peu fréquentés (champs, prairies, forêts, friches, marais...): On compte 1 personne par tranche de 100 ha. *Fiche 1, circulaire du 10/05/2010.*

$$P_{\text{présence}} = 10^{-6} * S_{\text{impact}}$$

Terrains aménagés et potentiellement fréquentés ou très fréquentés (parkings, parcs et jardins publics, zones de baignades surveillées, terrains de sport (sans gradins néanmoins...): On compte la capacité du terrain et a minima 10 personnes à l'hectare. *Fiche 1, circulaire du 10/05/2010.*

$$P_{\text{présence}} = 10^{-5} * S_{\text{impact}}$$

▪ Les voies de circulation automobile

Le risque est important de provoquer un sur-accident suite à la collision d'un morceau de pale sur un véhicule.

Les voies de circulation n'ont à être prises en considération que si elles sont empruntées par un nombre significatif de personnes. On comptabilise 0,4 personne permanente par kilomètre exposé par tranche de 100 véhicules/jour. *Fiche 1, circulaire du 10/05/2010.*

Ainsi, on ne retiendra que les routes dont on peu disposer d'une fréquentation : départementales, nationales et autoroutes.

On retiendra comme zone d'effet la longueur de l'objet ce qui correspond au cas le plus défavorable. On définit la probabilité par :

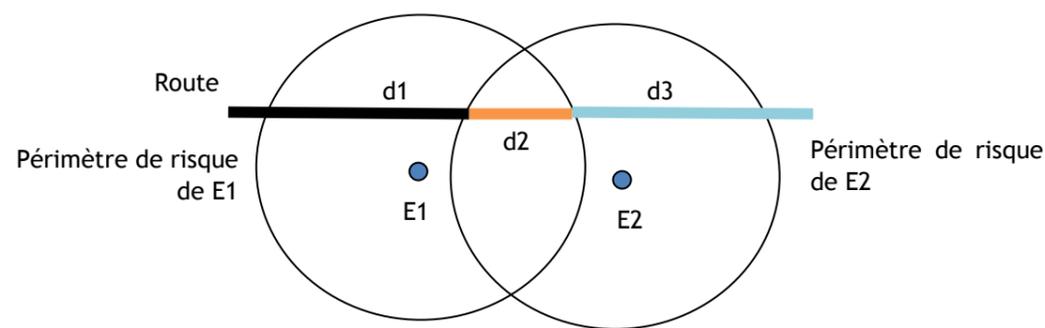
$$P_{\text{présence}} = 0,4 * f / 100 * L / 1000 \text{ (sans pouvoir être supérieur à 1)}$$

$$P_{\text{présence}} = 0,4 * f / 100 * 55 / 1000 \text{ pour une pale}$$

Avec :

- f : fréquentation temporelle sur les voies (véhicules/jour)
- L : longueur de la portion à risque (en m)

7.2.10. Effets cumulatifs



Représentation des périmètres de risque avec effets cumulés

Pour prendre en compte l'effet cumulatif des dangers quand une cible se situe dans plusieurs périmètres de risque, on additionnera l'indice de risque lié à chaque danger.

Dans le cas où la cible vulnérable serait dans le périmètre de risque de plusieurs éoliennes :

$$P_i = \sum_j P_j$$

j éoliennes

7.3. Modélisation

7.3.1. Données d'entrée

Le périmètre de risque de projection est de 399 m pour des fragments de pales et 180 m pour une pale entière (voir résultats de l'étude balistique Annexe 5). Nous étudierons le risque pour les cibles vulnérables se situant dans les zones de risques.

7.3.2. Cibles vulnérables

Les cibles vulnérables identifiées et leur distance en mètres par rapport aux éoliennes du parc sont les suivantes (on retiendra la distance la plus courte pour considérer l'intensité la plus forte et donc le risque le plus défavorable selon la méthodologie de la circulaire du 10/05/2010) :

N° cible	Cibles	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Scénario étudié
1	D29	261	775	1286	2181	2692	2676	2264	1655	1088	852	Projection fragments
2	D960	351	313	827	1735	2247	2193	1781	1170	616	634	Projection fragments
3	D960 +aire	487	505	903	1783	2284	2097	1696	1056	455	292	Projection fragments
4	D960	670	623	927	1762	2250	2000	1609	972	404	262	Projection fragments
5	Agriculteur	699	50	489	1391	1904	1895	1484	911	486	847	Projection pale et fragments

Résultat de modélisation de projection de pale

Remarque : Seule la cible 5 (agriculteur) a été retenue pour déterminer le risque lié à la fréquentation des zones agricoles. Sa position est fictive.

Les hypothèses retenues et données collectées pour chaque cible sont les suivantes :

N° cible	Cibles	fréquentation	Longueur à risque en m	densité	S _{impact} en m ²	P _{présence} scénario projection fragments	P _{présence} scénario projection pale
1	D29	850	2			6,80E-03	
2	D960	1 169	2			9,35E-03	
3	D960 +aire	1 169	2			9,35E-03	
4	D960	1 169	2			9,35E-03	
5	Agriculteur			1E-06	9 503		9,50E-03
5	Agriculteur			1E-06	12,6	1,26E-05	

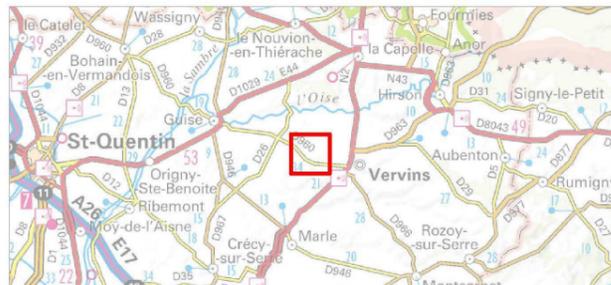
Résultat de modélisation de projection de pale

Les données de fréquentation sont issues de comptages routiers réalisés par le conseil général de l'Aisne en 2010.

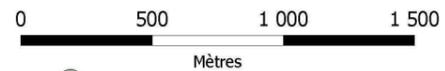
VALOREM
Projet du parc éolien de Voulpaix (02)

Dossier de demande d'autorisation d'exploiter

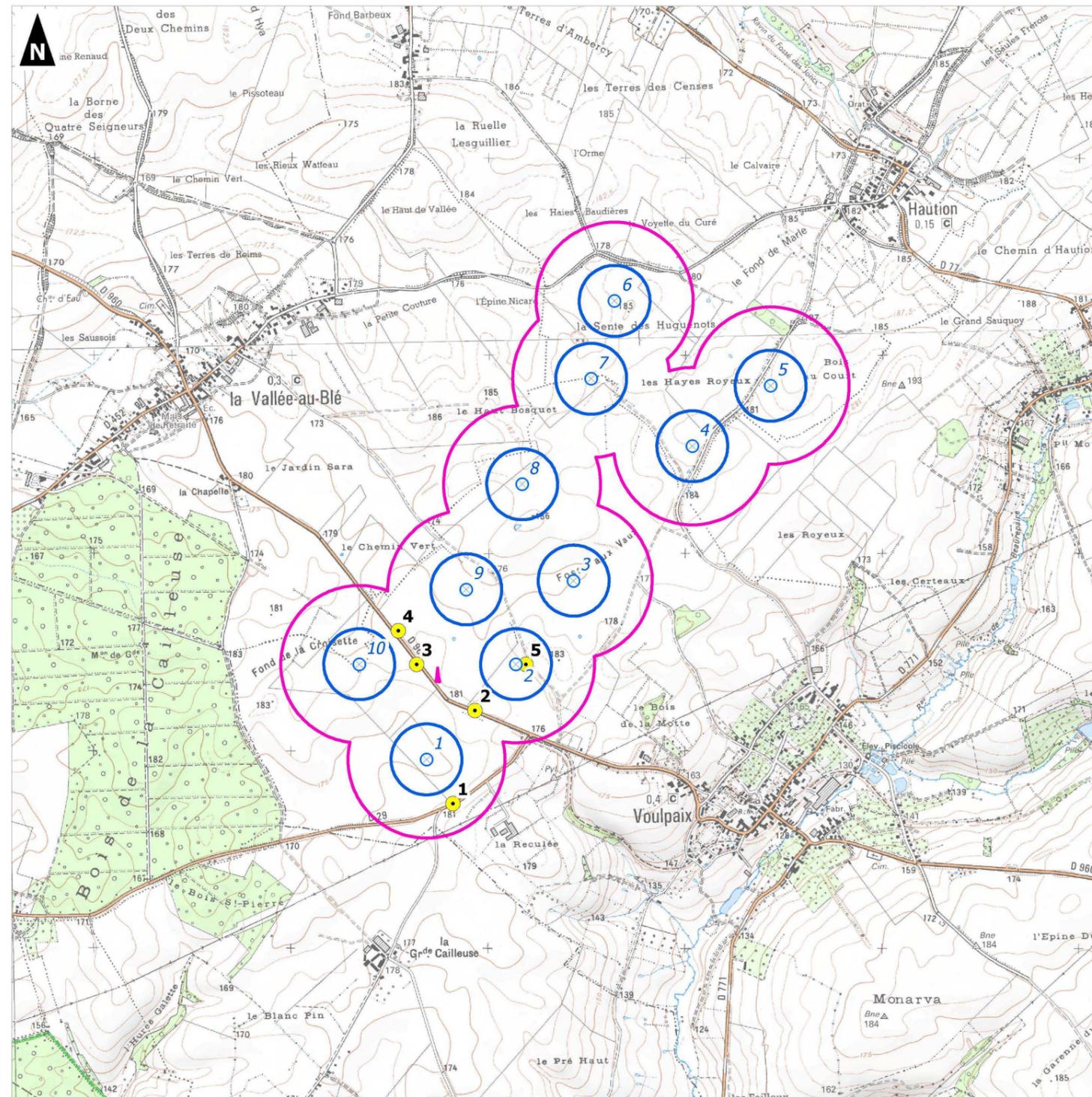
Périmètre de risque de projection et cibles potentielles



-  Eoliennes
 -  Périmètre de 180 m de risque projection de pale
 -  Périmètre de 399 m de risque projection de fragments de pale
 -  Cibles
- Routes :**
- 1, D29
 - 2, D960
 - 3, D960 +aire
 - 4, D960
- Zone agricole :**
- 5, Agriculteur



Réalisation : C. Hanique - AIRELE - n°12 03 0018
Source de fond de carte : IGN, série bleue, 1/25 000 - IGN, Scan 1000
Sources de données : VALOREM, 2012 - AIRELE, 2012



Périmètre de risque de projection et cibles potentielles

7.3.3. Résultats de la modélisation

Les risques de collision en tenant compte de toutes les éoliennes, sont calculés avec la formule (1) et les hypothèses ci-dessus. L'indice de risque est donné dans les tableaux ci-dessous par scénario redouté :

Scénario de projection d'un fragment de pale

N° cible	Cibles	P _{collision}	P _{présence}	Indice de risque
1	D29	8,00E-10	6,80E-03	5,44E-12
2	D960	1,40E-09	9,35E-03	1,31E-11
3	D960 +aire	2,00E-09	9,35E-03	1,87E-11
4	D960	1,40E-09	9,35E-03	1,31E-11
5	Agriculteur	8,20E-09	1,26E-05	1,03E-13

Résultat de modélisation de projection de fragment de pale

Scénario de projection de pale

N° cible	Cibles	P _{collision}	P _{présence}	Indice de risque
5	Agriculteur	5,00E-06	9,50E-03	4,75E-08

Résultat de modélisation de projection de pale

8. Conclusion

Sur la base des hypothèses de calcul prises en compte et présentées, les distances de projection maximales modélisées par l'étude balistique n'atteignent pas d'habitations, d'installation SEVESO ni d'installation nucléaire de base.

De plus, rappelons le choix de retenir les hypothèses majorantes suivantes :

- Les événements « projection d'objet » et « présence de cible » sont des événements indépendants,
- Les statistiques de défaillance du NOVEM,
- Probabilité de collision du guide NOVEM pour le scénario de projection de pale,
- La surface de l'objet projeté calculée à partir de la plus grande longueur de l'objet,
- La zone d'effet considérée est la longueur de la pale,
- Considération du point le plus proche des linéaires.

Pour d'autres hypothèses, ont été retenues les données de la littérature disponible au jour de la rédaction de l'étude :

- Probabilité de collision du guide NOVEM pour le scénario de projection de fragment de pale.

Dans le périmètre de risque, les calculs d'indice de risque permettent de conclure que les événements redoutés sont extrêmement improbables. En effet l'indice de risque pour le scénario redouté de projection de pale ou objet est inférieur à 10^{-6} (niveau d'acceptabilité fixé par le *Netherlands ministry of spatial Planing housing and the environment*).

Le projet permet d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation. Le niveau de risque est jugé acceptable.

10. Annexe 1 : Certificat de conformité SIEMENS aux exigences de l'arrêté du 26 août 2011

SIEMENS

 Conformité Siemens WP – ICPE
 E W R2-30-FR00057-2778-00
 SCA/07.11.2011

Conformité à l'Arrêté du 26 août 2011 - Régime des ICPE -

Suite à l'entrée en vigueur de « l'Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement », nous vous informons la stricte conformité de nos aérogénérateurs, de nos procédures de maintenance et de Service après-vente, ainsi que de nos procédures Environnement, Santé et Sécurité à l'ensemble des dispositions contenues audit Arrêté.

Cette conformité que nous sommes en mesure de vous garantir concerne l'ensemble de la gamme de nos aérogénérateurs (Direct Drive et à multiplicateur).

Les informations techniques détaillées ci-après reprennent les différentes dispositions contenues à l'Arrêté du 26 août 2011 et indiquent les réponses de Siemens Wind Power. Ce document pourra par ailleurs être utile dans le cadre d'une procédure administrative qui pourrait être menée.

NOR: DEVP1119348A					
Article	Contenu de l'article	Réponse SIEMENS	Conception	Service après-vente	Environnement, Santé et Sécurité
Art. 5	Afin de limiter l'impact sanitaire lié aux effets stroboscopiques, lorsqu'un aérogénérateur est implanté à moins de 250 mètres d'un bâtiment à usage de bureaux, l'exploitant réalise une étude démontrant que l'ombre projetée de l'aérogénérateur n'impacte pas plus de trente heures par an et une demi-heure par jour le bâtiment.	Aérogénérateurs pouvant être équipés de dispositifs limitant l'impact des ombres projetées	✓		
Art. 6	L'installation est implantée de telle sorte que les habitations ne sont pas exposées à un champ magnétique émanant des aérogénérateurs supérieur à 100 micro testas à 50-60 Hz.	Caractéristiques des aérogénérateurs permettant la mise en conformité de l'installation	✓		

SIEMENS

Conformité Siemens WP – ICPE
E W R2-30-FR00057-2778-00
SCA/07.11.2011

NOR: DEVP1119348A					
Article	Contenu de l'article	Réponse SIEMENS	Conception	Service après-vente	Environnement, Santé et Sécurité
Art. 8	L'aérogénérateur est conforme aux dispositions de la norme NF EN 61 400-1 dans sa version de juin 2006 ou CEI 61 400-1 dans sa version de 2005 ou toute norme équivalente en vigueur dans l'Union européenne, à l'exception des dispositions contraires aux prescriptions du présent arrêté.	Aérogénérateurs conforme à l'article et normes en référence	✓		
Art. 9	L'installation est mise à la terre. Les aérogénérateurs respectent les dispositions de la norme IEC 61 400-24 (version de juin 2010). L'exploitant tient à disposition de l'inspection des installations classées les rapports des organismes compétents attestant de la conformité des aérogénérateurs à la norme précitée. Les opérations de maintenance incluent un contrôle visuel des pales et des éléments susceptibles d'être impactés par la foudre.	Aérogénérateurs conforme aux normes en vigueur. Opérations de maintenance Siemens Conformés à l'article **	✓	✓	
Art. 10	Les installations électriques à l'intérieur de l'aérogénérateur respectent les dispositions de la directive du 17 mai 2006 susvisée qui leur sont applicables.	Installation électriques conformes à la directive	✓		
Art. 11	Le ballastage de l'installation est conforme aux dispositions prises en application des articles L. 6351-6 et L. 6352-1 du code des transports et des articles R. 243-1 et R. 244-1 du code de l'aviation civile.	Ballastage approprié permettant une conformité aux dispositions de l'article	✓		
Art. 13	Les personnes étrangères à l'installation n'ont pas d'accès libre à l'intérieur des aérogénérateurs. Les accès à l'intérieur de chaque aérogénérateur, du poste de transformation, de raccordement ou de livraison sont maintenus fermés à clef afin d'empêcher les personnes non autorisées d'accéder aux équipements.	Procédures d'exploitation conformes et/ou permettant la conformité à l'article **		✓	✓
Art. 14	Les prescriptions à observer par les tiers sont affichées soit en caractères lisibles, soit au moyen de pictogrammes sur un panneau sur le chemin d'accès de chaque aérogénérateur, sur le poste de livraison et, le cas échéant, sur le poste de raccordement. Elles concernent notamment: - les consignes de sécurité à suivre en cas de situation anormale; - l'interdiction de pénétrer dans l'aérogénérateur ; - la mise en garde face aux risques d'électrocution ; - la mise en garde, le cas échéant, face au risque de chute de glace.	Préconisation pour la Signalétique (responsabilité du client) Rédaction de Notice Santé, Sécurité et Environnement conformes aux dispositions de l'article **			✓
Art. 15	Avant la mise en service industrielle d'un aérogénérateur, l'exploitant réalise des essais permettant de s'assurer du fonctionnement correct de l'ensemble des équipements. Ces essais comprennent : - un arrêt ; - un arrêt d'urgence ; - un arrêt depuis un régime de survitesse ou une simulation de ce régime. Suivant une périodicité qui ne peut excéder un an, l'exploitant réalise une vérification de l'état fonctionnel des équipements de mise à l'arrêt, de mise à l'arrêt d'urgence et de mise à l'arrêt depuis un régime de survitesse en application des préconisations du constructeur de l'aérogénérateur.	Procédures d'installation et d'exploitation ** conformes à l'article	✓	✓	
Art. 16	L'intérieur de l'aérogénérateur est maintenu propre. L'entreposage à l'intérieur de l'aérogénérateur de matériaux combustibles ou inflammables est interdit.	Procédures d'exploitation conformes aux dispositions de l'article ** Notices Santé, Sécurité et Environnement conformes aux		✓	✓

SIEMENS

Conformité Siemens WP – ICPE
E W R2-30-FR00057-2778-00
SCA/07.11.2011

NOR: DEVP1119348A					
Article	Contenu de l'article	Réponse SIEMENS	Conception	Service après-vente	Environnement, Santé et Sécurité
		dispositions de l'article **			
Art. 17	Le fonctionnement de l'installation est assuré par un personnel compétent disposant d'une formation portant sur les risques présentés par l'installation, ainsi que sur les moyens mis en œuvre pour les éviter. Il connaît les procédures à suivre en cas d'urgence et procède à des exercices d'entraînement, le cas échéant, en lien avec les services de secours.	Procédures d'exploitation conformes aux dispositions de l'article ** Notices Santé, Sécurité et Environnement reprennent ces dispositions		✓	✓
Art. 18	Trois mois, puis un an après la mise en service industrielle, puis suivant une périodicité qui ne peut excéder trois ans, l'exploitant procède à un contrôle de l'aérogénérateur consistant en un contrôle des brides de fixations, des brides de mât, de la fixation des pales et un contrôle visuel du mât. Selon une périodicité qui ne peut excéder un an, l'exploitant procède à un contrôle des systèmes instrumentés de sécurité.	Procédures d'exploitation conformes aux dispositions de l'article **		✓	
Art. 19	L'exploitant dispose d'un manuel d'entretien de l'installation dans lequel sont précisées la nature et les fréquences des opérations d'entretien afin d'assurer le bon fonctionnement de l'installation. L'exploitant tient à jour pour chaque installation un registre dans lequel sont consignées les opérations de maintenance ou d'entretien et leur nature, les défaillances constatées et les opérations correctives engagées.	Procédures d'exploitation conformes aux dispositions de l'article **		✓	
Art. 20	L'exploitant élimine ou fait éliminer les déchets produits dans des conditions propres à garantir les intérêts mentionnés à l'article L. 511-1 du code de l'environnement. Il s'assure que les installations utilisées pour cette élimination sont régulièrement autorisées à cet effet. Le brûlage des déchets à l'air libre est interdit.	Procédures d'exploitation conformes aux dispositions de l'article ** Notices Santé, Sécurité et Environnement conformes aux dispositions de l'article **			✓
Art. 21	Les déchets non dangereux (par exemple bois, papier, verre, textile, plastique, caoutchouc) et non souillés par des produits toxiques ou polluants sont récupérés, valorisés ou éliminés dans des installations autorisées				
Art. 22	Des consignes de sécurité sont établies et portées à la connaissance du personnel en charge de l'exploitation et de la maintenance. Ces consignes indiquent : - les procédures d'arrêt d'urgence et de mise en sécurité de l'installation ; - les limites de sécurité de fonctionnement et d'arrêt ; - les précautions à prendre avec l'emploi et le stockage de produits incompatibles ; - les procédures d'alertes avec les numéros de téléphone du responsable d'intervention de l'établissement, des services d'incendie et de secours. Les consignes de sécurité indiquent également les mesures à mettre en œuvre afin de maintenir les installations en sécurité dans les situations suivantes : survitesse, conditions de gel, orages, tremblements de terre, haubans rompus ou relâchés, défaillance des freins, balourd du rotor, fixations détendues, défauts de lubrification, tempêtes de sable, incendie ou inondation.	Aérogénérateurs équipés de dispositifs appropriés et Notices Santé, Sécurité et Environnement conformes aux dispositions de l'article **	✓		✓
Art. 23	Chaque aérogénérateur est doté d'un système de détection qui permet d'alerter, à tout moment, l'exploitant ou un opérateur qu'il aura désigné, en cas d'incendie ou d'entrée en survitesse de l'aérogénérateur. L'exploitant ou un opérateur qu'il aura désigné est en mesure de transmettre l'alerte aux services d'urgence compétents dans un délai de quinze minutes suivant l'entrée en fonctionnement anormal de l'aérogénérateur. L'exploitant dresse la liste de ces détecteurs avec leur	Aérogénérateurs équipés de dispositif de détection appropriés et dispositifs d'alerte et d'entretien ** conformes à	✓	✓	✓

SIEMENS

Conformité Siemens WP – ICPE
E W R2-30-FR00057-2778-00
SCA/07.11.2011

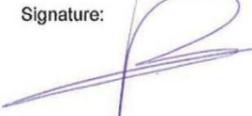
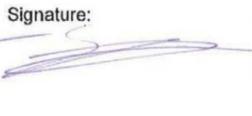
NOR: DEVP1119348A														
Article	Contenu de l'article	Réponse SIEMENS	Conception	Service après-vente	Environnement, Santé et Sécurité									
	fonctionnalité et détermine les opérations d'entretien destinées à maintenir leur efficacité dans le temps.	l'article												
Art. 24	Chaque aérogénérateur est doté de moyens de lutte contre l'incendie appropriés aux risques et conformes aux normes en vigueur, notamment : - d'un système d'alarme qui peut être couplé avec le dispositif mentionné à l'article 23 et qui informe l'exploitant à tout moment d'un fonctionnement anormal. Ce dernier est en mesure de mettre en œuvre les procédures d'arrêt d'urgence mentionnées à l'article 22 dans un délai de soixante minutes ; - d'au moins deux extincteurs situés à l'intérieur de l'aérogénérateur, au sommet et au pied de celui-ci. Ils sont positionnés de façon bien visible et facilement accessible. Les agents d'extinction sont appropriés aux risques à combattre. Cette disposition ne s'applique pas aux aérogénérateurs ne disposant pas d'accès à l'intérieur du mât.	Aérogénérateurs équipés de dispositif de détection appropriés et dispositifs d'alerte et d'entretien conformes à l'article	✓	✓	✓									
Art. 25	Chaque aérogénérateur est équipé d'un système permettant de détecter ou de déduire la formation de glace sur les pales de l'aérogénérateur. En cas de formation importante de glace, l'aérogénérateur est mis à l'arrêt dans un délai maximal de soixante minutes. L'exploitant définit une procédure de redémarrage de l'aérogénérateur en cas d'arrêt automatique lié à la présence de glace sur les pales. Cette procédure figure parmi les consignes de sécurité mentionnées à l'article 22.	Aérogénérateurs équipés de dispositif de détection appropriés et procédures d'exploitation conformes à l'article	✓	✓										
Art. 26	L'installation est construite, équipée et exploitée de façon telle que son fonctionnement ne puisse être à l'origine de bruits transmis par voie aérienne ou solide susceptible de compromettre la santé ou la sécurité du voisinage. Les émissions sonores émises par l'installation ne sont pas à l'origine, dans les zones à émergence réglementée, d'une émergence supérieure aux valeurs admissibles définies dans le tableau suivant : <table border="1" data-bbox="371 1102 816 1165"> <thead> <tr> <th>Niveau de bruit au point existant</th> <th>Émergence admissible pour la période</th> <th>Émergence admissible pour la période</th> </tr> <tr> <th>supérieure à 20 heures</th> <th>supérieure à 2 heures</th> <th>supérieure à 2 heures</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50 à 60 dB(A)</td> <td>3 dB(A)</td> <td>3 dB(A)</td> </tr> </tbody> </table> Les valeurs d'émergence mentionnées ci-dessus peuvent être augmentées d'un terme correctif en dB (A), fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit de l'installation égal à : Trois pour une durée supérieure à vingt minutes et inférieure ou égale à deux heures ; Deux pour une durée supérieure à deux heures et inférieure ou égale à quatre heures ; Un pour une durée supérieure à quatre heures et inférieure ou égale à huit heures ; Zéro pour une durée supérieure à huit heures. En outre, le niveau de bruit maximal est fixé à 70 dB (A) pour la période jour et de 60 dB (A) pour la période nuit. Ce niveau de bruit est mesuré en n'importe quel point du périmètre de mesure du bruit défini à l'article 2. Lorsqu'une zone à émergence réglementée se situe à l'intérieur du périmètre de mesure du bruit, le niveau de bruit maximal est alors contrôlé pour chaque aérogénérateur de l'installation à la distance R définie à l'article 2. Cette disposition n'est pas applicable si le bruit résiduel pour la période considérée est supérieur à cette limite. Dans le cas où le bruit particulier de l'établissement est à tonalité marquée au sens du point 1.9 de l'annexe à l'arrêté du 23 janvier 1997 susvisé, de manière établie ou cyclique, sa durée d'apparition ne peut excéder 30 % de la durée de fonctionnement de l'établissement dans chacune	Niveau de bruit au point existant	Émergence admissible pour la période	Émergence admissible pour la période	supérieure à 20 heures	supérieure à 2 heures	supérieure à 2 heures	50 à 60 dB(A)	3 dB(A)	3 dB(A)	Les caractéristiques techniques des aérogénérateurs ainsi que les dispositifs disponibles donnent la possibilité à l'exploitant de se conformer aux dispositions de cet article	✓		
Niveau de bruit au point existant	Émergence admissible pour la période	Émergence admissible pour la période												
supérieure à 20 heures	supérieure à 2 heures	supérieure à 2 heures												
50 à 60 dB(A)	3 dB(A)	3 dB(A)												

SIEMENS

Conformité Siemens WP – ICPE
E W R2-30-FR00057-2778-00
SCA/07.11.2011

NOR: DEVP1119348A					
Article	Contenu de l'article	Réponse SIEMENS	Conception	Service après-vente	Environnement, Santé et Sécurité
	des périodes diurne ou nocturne définies dans le tableau ci-dessus. Lorsque plusieurs installations classées, soumises à autorisation au titre de rubriques différentes, sont exploitées par un même exploitant sur un même site, le niveau de bruit global émis par ces installations respecte les valeurs limites ci-dessus.				
Art. 27	Les véhicules de transport, les matériels de manutention et les engins de chantier utilisés à l'intérieur de l'installation sont conformes aux dispositions en vigueur en matière de limitation de leurs émissions sonores. En particulier, les engins de chantier sont conformes à un type homologué. L'usage de tous appareils de communication par voie acoustique (par exemple sirènes, avertisseurs, haut-parleurs), gênant pour le voisinage, est interdit, sauf si leur emploi est exceptionnel et réservé à la prévention et au signalement d'incidents graves ou d'accidents.	Procédures d'exploitation Siemens Conformement aux dispositions de l'article		✓	✓
Art. 28	Lorsque des mesures sont effectuées pour vérifier le respect des présentes dispositions, elles sont effectuées selon les dispositions de la norme NF 31-114 dans sa version en vigueur six mois après la publication du présent arrêté ou à défaut selon les dispositions de la norme NFS 31-114 dans sa version de juillet 2011.	Dispositions de l'article en cours de finalisation à date		✓	

REMARQUE : "*" couvert dans le cas d'une souscription à un contrat de service de type LTP ou SAA Siemens Wind Power.

SIEMENS S.A.S.		
Place, Date:	Place, Date:	Place, Date:
Brande (DK), 08/11/2011	Saint-Denis, 08/11/2011	Saint-Denis, 08/11/2011
Peder Riis NICKELSEN Head of E W EN PLM	Raymond COULOIGNER Head ES SR WP France	Sébastien DUVERGER Q-EHS Coordinator E France
Signature: 	Signature: 	Signature: 

11. Annexe 2 : Retours d'expérience - Accidentologie

Le groupe de travail constitué en vue de la réalisation du présent guide a effectué un recensement des accidents qui se sont produits sur des aérogénérateurs en France et dans le monde. Les parties suivantes synthétisent les informations collectées.

11.1. Recensement des incidents et accidents au niveau français

Plusieurs sources ont été utilisées pour effectuer ce recensement. Il s'agit à la fois de sources officielles, d'articles de la presse locale ou de base de données mises en place par des associations :

- Rapport du Conseil Général des Mines (juillet 2004) ;
- Base de données ARIA du Ministère du Développement Durable (<http://www.aria.developpementdurable.gouv.fr/>) ;
- Communiqués de presse du SER-FEE et/ou des exploitants éoliens ;
- Site Internet de l'association « Vent de Colère » ;
- Site Internet de l'association « Fédération Environnement Durable » ;
- Articles de presse divers ;
- Données diverses fournies par les exploitants de parcs éoliens en France.

Dans le cadre de ce recensement, il n'a pas été réalisé d'enquête exhaustive directe auprès des exploitants de parcs éoliens français. Cette démarche pourrait augmenter le nombre d'incidents recensés notamment pour les incidents les moins graves. Cette démarche pourra être entreprise en complément.

Dans l'état actuel, la base de données du groupe de travail apparaît comme représentative des incidents majeurs ayant affecté le parc éolien français depuis l'année 2000. L'ensemble de ces sources permet d'arriver à un inventaire aussi complet que possible des incidents survenus en France. Un total de 32 incidents a pu être recensé entre 2000 et 2011 par le groupe de travail (voir tableau détaillé en annexe 2). Ce tableau de travail a été validé par les membres du groupe de travail.

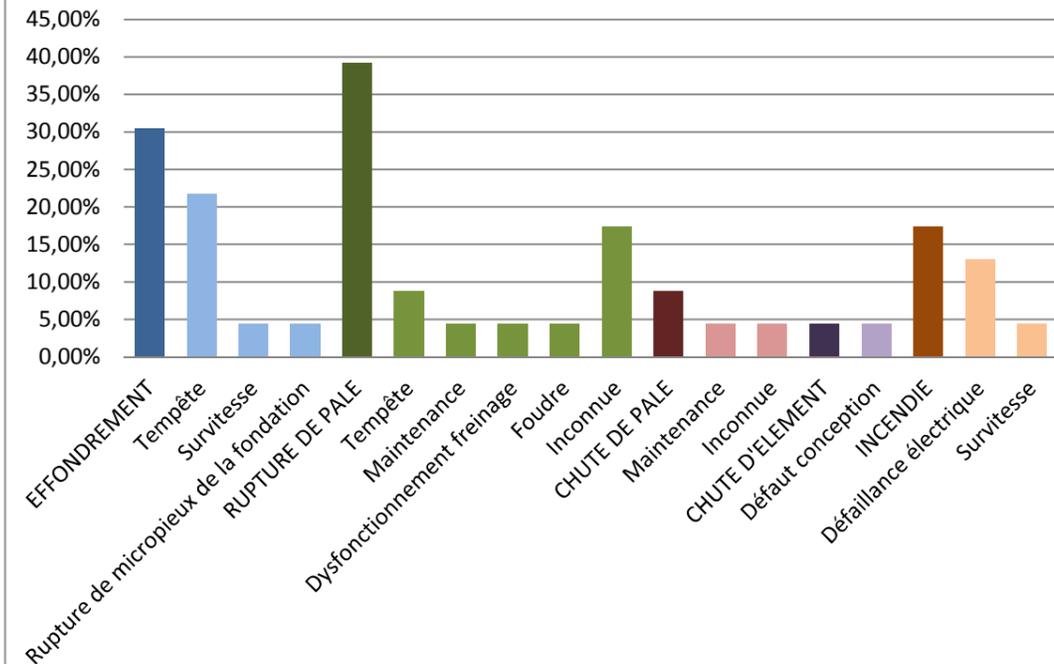
Il apparaît dans ce recensement que les aérogénérateurs accidentés sont principalement des modèles anciens ne bénéficiant généralement pas des dernières avancées technologiques.

Le graphique suivant montre la répartition des événements accidentels et de leurs causes premières sur le parc d'aérogénérateur français entre 2000 et 2010. Cette synthèse exclut les accidents du travail et les événements qui n'ont pas conduit à des effets sur les zones autour des aérogénérateurs. L'identification des causes est nécessairement réductrice. Dans ce graphique sont présentés :

La répartition des événements effondrement, rupture de pale, chute de pale, chute d'éléments et incendie, par rapport à la totalité des accidents observés en France. Elles sont représentées par des histogrammes de couleur foncée ;

La répartition des causes premières pour chacun des événements décrits ci-dessus. Celle-ci est donnée par rapport à la totalité des accidents observés en France. Elles sont représentées par des histogrammes de couleur claire.

Répartition des événements accidentels et de leurs causes premières sur le parc d'aérogénérateur français entre 2000 et 2010

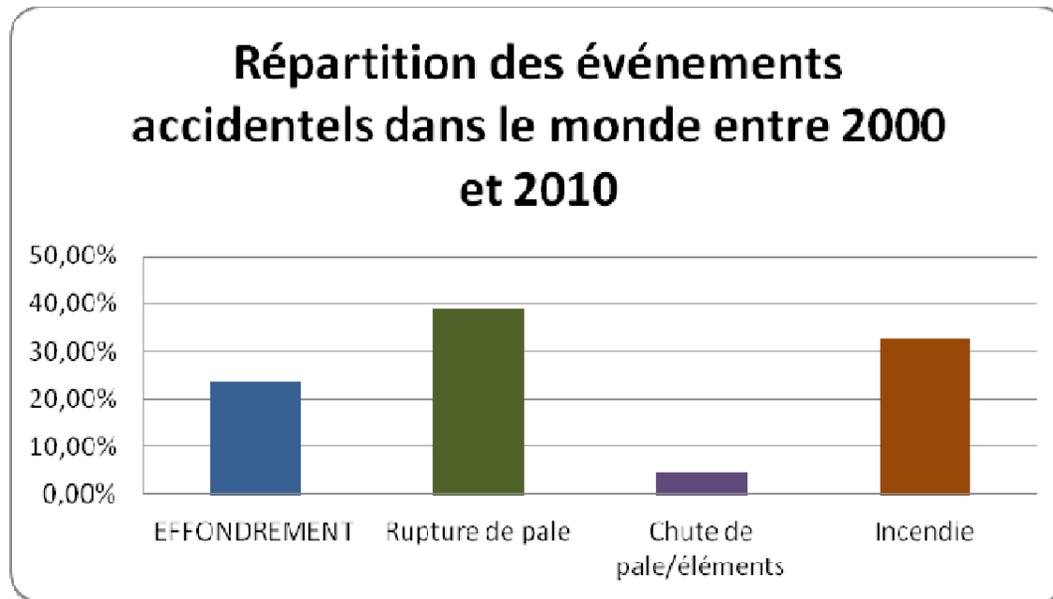


Par ordre d'importance, les accidents les plus recensés sont les ruptures de pale, les effondrements, les incendies, les chutes de pale et les chutes des autres éléments de l'éolienne. La principale cause de ces accidents est les tempêtes.

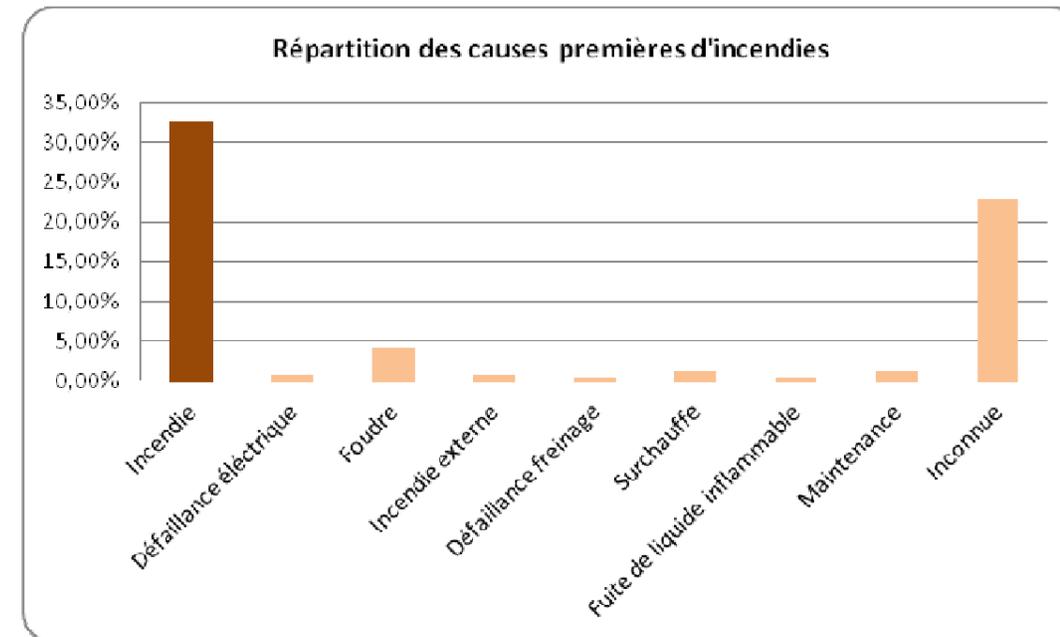
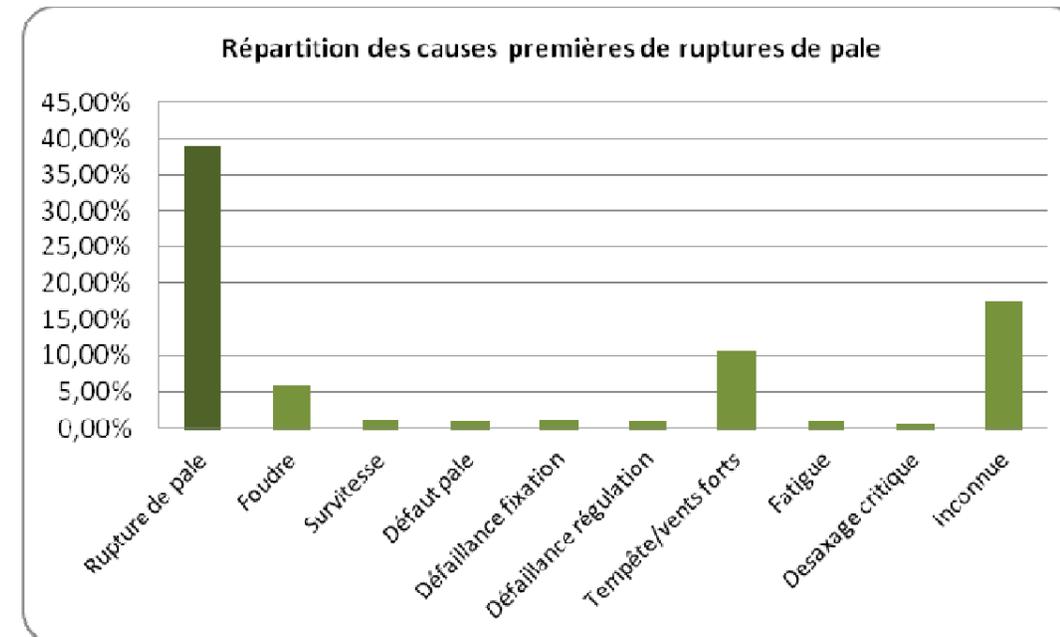
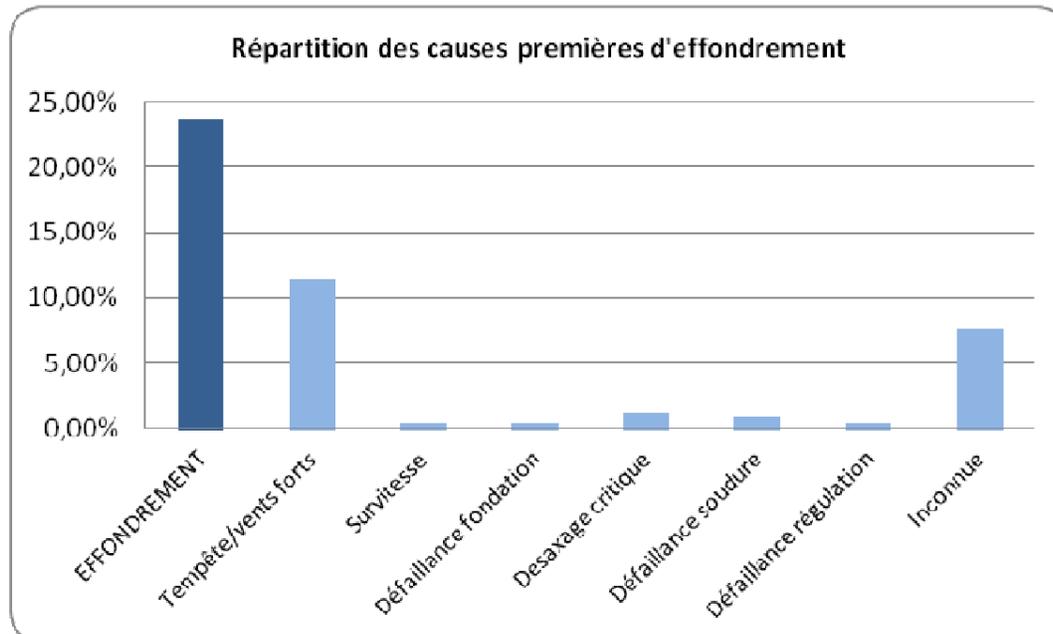
11.2. Recensement des incidents et accidents au niveau international

La synthèse ci-dessous provient de l'analyse de 236 accidents dans le monde issus des descriptions de 994 accidents proposés par le CWIF : sur les 994 accidents, seuls 236 sont considérés comme des « accidents majeurs » - les autres concernant plutôt des accidents du travail, des presque-accidents, des incidents, etc.

Le graphique suivant montre la répartition des événements accidentels par rapport à la totalité des accidents analysés.



Ci-après, est présenté le recensement des causes premières pour chacun des événements accidentels recensés (données en répartition par rapport à la totalité des accidents analysés).



Tout comme pour le retour d'expérience français, ce retour d'expérience montre l'importance des causes « tempêtes et vents forts » dans les accidents. Il souligne également le rôle de la foudre dans les accidents.

11.3. Limites d'utilisation de l'accidentologie

Ces retours d'expérience doivent être pris avec précaution. Ils comportent notamment les biais suivants :

La non-exhaustivité des événements : ce retour d'expérience, constitué à partir de sources variées, ne provient pas d'un système de recensement organisé et systématique. Dès lors certains événements ne sont pas reportés. En particulier, les événements les moins spectaculaires peuvent être négligés : chutes d'éléments, projections et chutes de glace.

La non-homogénéité des aérogénérateurs inclus dans ce retour d'expérience : les aérogénérateurs observés n'ont pas été construits aux mêmes époques et ne mettent pas en œuvre les mêmes technologies. Les informations sont très souvent manquantes pour distinguer les différents types d'aérogénérateurs (en particulier concernant le retour d'expérience mondial) ;

Les importantes incertitudes sur les causes et sur la séquence qui a mené à un accident : de nombreuses informations sont manquantes ou incertaines sur la séquence exacte des accidents ;

L'analyse du retour d'expérience permet ainsi de dégager de grandes tendances, mais comportent des incertitudes importantes.

11.4. Inventaire de l'accidentologie en France

Le tableau ci-dessous a été établi lors de l'élaboration du guide INERIS / FEE. Il recense l'ensemble des accidents et incidents connus en France concernant la filière éolienne entre 2000 et fin 2011. L'analyse de ces données est présentée en annexe 2.

Type d'accident	Date	Nom du parc	Département	Puissance (en MW)	Année de mise en service	Technologie récente	Description sommaire de l'accident et dégâts	Cause probable de l'accident	Source(s) de l'information
Effondrement	Novembre 2000	Port la Nouvelle	Aude	0,5	1993	Non	Le mât d'une éolienne s'est plié lors d'une tempête suite à la perte d'une pale (coupure courant prolongée pendant 4 jours suite à la tempête)	Tempête avec foudre répétée	Rapport du CGM Site Vent de Colère
Rupture de pale	2001	Sallèles-Limousis	Aude	0,75	1998	Non	Bris de pales en bois (avec inserts)	?	Site Vent de Colère
Effondrement	01/02/2002	Wormhout	Nord	0,4	1997	Non	Bris d'hélice et mât plié	Tempête	Rapport du CGM Site Vent du Bocage
Maintenance	01/07/2002	Port la Nouvelle - Sigean	Aude	0,66	2000	Oui	Grave électrisation avec brûlures d'un technicien	Lors de mesures pour cartériser la partie haute d'un transformateur 690V/20kV en tension. Le mètre utilisé par la victime, déroulé sur 1,46m, s'est soudainement plié et est entré dans la zone du transformateur, créant un arc électrique.	Rapport du CGM
Effondrement	28/12/2002	Névian - Grande Garrigue	Aude	0,85	2002	Oui	Effondrement d'une éolienne suite au dysfonctionnement du système de freinage	Tempête + dysfonctionnement du système de freinage	Rapport du CGM Site Vent de Colère Article de presse (Midi Libre)
Rupture de pale	25/02/2002	Sallèles-Limousis	Aude	0,75	1998	Non	Bris de pale en bois (avec inserts) sur une éolienne bipale	Tempête	Article de presse (La Dépêche du 26/03/2003)
Rupture de pale	05/11/2003	Sallèles-Limousis	Aude	0,75	1998	Non	Bris de pales en bois (avec inserts) sur trois éoliennes. Morceaux de pales disséminés sur 100m.	Dysfonctionnement du système de freinage	Rapport du CGM Article de presse (Midi Libre du 15/11/2003)
Effondrement	01/01/2004	Le Portel - Boulogne sur Mer	Pas de Calais	0,75	2002	Non	Cassure d'une pale, chute du mât et destruction totale. Une pale tombe sur la plage et les deux autres dérivent sur 8 kms.	Tempête	Base de données ARIA Rapport du CGM Site Vent de Colère Articles de presse (Windpower Monthly May 2004, La Voix du Nord du 02/01/2004)
Effondrement	20/03/2004	Loon Plage - Port de Dunkerque	Nord	0,3	1996	Non	Couchage du mât d'une des 9 éoliennes suite à l'arrachement de la fondation	Rupture de 3 des 4 micropieux de la fondation, erreur de calcul (facteur de 10)	Base de données ARIA Rapport du CGM Site Vent de Colère Articles de presse (La Voix du Nord du 20/03/2004 et du 21/03/2004)

Type d'accident	Date	Nom du parc	Département	Puissance (en MW)	Année de mise en service	Technologie récente	Description sommaire de l'accident et dégâts	Cause probable de l'accident	Source(s) de l'information
Rupture de pale	22/06/2004 et 08/07/2004	Pleyber-Christ - Site du Télégraphe	Finistère	0,3	2001	Non	Survitesse puis éjection de bouts de pales de 1,5 et 2,5m à 50m, mat intact	Tempête + problème d'allongement des pales et retrait de sécurité (débridage)	Rapport du CGM Articles de presse (Le Télégramme, Ouest France du 09/07/2004)
Rupture de pale	2004	Escales-Conilhac	Aude	0,75	2003	Non	Bris de trois pales		Site Vent de Colère
Rupture de pale	22/12/2004	Montjoyer-Rochefort	Drôme	0,75	2004	Non	Bris des trois pales et début d'incendie sur une éolienne (survitesse de plus de 60 tr/min)	Survitesse due à une maintenance en cours, problème de régulation, et dysfonctionnement du système de freinage	Base de données ARIA Article de presse (La Tribune du 30/12/2004) Site Vent de Colère
Rupture de pale	2005	Wormhout	Nord	0,4	?	Non	Bris de pale		Site Vent de Colère
Rupture de pale	08/10/2006	Pleyber-Christ - Site du Télégraphe	Finistère	0,3	2004	Non	Chute d'une pale de 20m pesant 3 tonnes	Allongement des pales et retrait de sécurité (débridage), pas de REX suite aux précédents accidents sur le même parc	Site FED Articles de presse (Ouest France) Journal FR3
Incendie	18/11/2006	Roquetaillade	Aude	0,66	2001	Oui	Acte de malveillance: explosion de bonbonne de gaz au pied de 2 éoliennes. L'une d'entre elles a mis le feu en pieds de mat qui s'est propagé jusqu'à la nacelle.	Malveillance / incendie criminel	Communiqués de presse exploitant Articles de presse (La Dépêche, Midi Libre)
Effondrement	03/12/2006	Bondues	Nord	0,08	1993	Non	Sectionnement du mât puis effondrement d'une éolienne dans une zone industrielle	Tempête (vents mesurés à 137Kmh)	Article de presse (La Voix du Nord)
Rupture de pale	31/12/2006	Ally	Haute-Loire	1,5	2005	Oui	Chute de pale lors d'un chantier de maintenance visant à remplacer les rotors	Accident faisant suite à une opération de maintenance	Site Vent de Colère
Rupture de pale	03/2007	Clitourps	Manche	0,66	2005	Oui	Rupture d'un morceau de pale de 4m et éjection à plus de 200m de distance dans un champ	Cause pas éclaircie	Site FED
Chute d'élément	11/10/2007	Plouvien	Finistère	1,3	2007	Non	Chute d'un élément de la nacelle (trappe de visite de 50 cm de diamètre)	Défaut au niveau des charnières de la trappe de visite. Correctif appliqué et retrofit des boulons de charnières effectué sur toutes les machines en exploitation.	Article de presse (Le Télégramme)
Emballement	03/2008	Dinéault	Finistère	0,3	2002	Non	Emballement de l'éolienne mais pas de bris de pale	Tempête + système de freinage hors service (boulon manquant)	Base de données ARIA

Type d'accident	Date	Nom du parc	Département	Puissance (en MW)	Année de mise en service	Technologie récente	Description sommaire de l'accident et dégâts	Cause probable de l'accident	Source(s) de l'information
Collision avion	04/2008	Plouguin	Finistère	2	2004	Non	Léger choc entre l'aile d'un bimoteur Beechcraftch (liaison Ouessant-Brest) et une pale d'éolienne à l'arrêt. Perte d'une pièce de protection au bout d'aile. Mise à l'arrêt de la machine pour inspection.	Mauvaise météo, conditions de vol difficiles (sous le plafond des 1000m imposé par le survol de la zone) et faute de pilotage (altitude trop basse)	Articles de presse (Le Télégramme, Le Post)
Rupture de pale	19/07/2008	Erize-la-Brûlée - Voie Sacrée	Meuse	2	2007	Oui	Chute de pale et projection de morceaux de pale suite à un coup de foudre	Foudre + défaut de pale	Communiqué de presse exploitant Article de presse (l'Est Républicain 22/07/2008)
Incendie	28/08/2008	Vauvillers	Somme	2	2006	Oui	Incendie de la nacelle	Problème au niveau d'éléments électroniques	Dépêche AFP 28/08/2008
Rupture de pale	26/12/2008	Raival - Voie Sacrée	Meuse	2	2007	Oui	Chute de pale		Communiqué de presse exploitant Article de presse (l'Est Républicain)
Maintenance	26/01/2009	Clastres	Aisne	2,75	2004	Oui	Accident électrique ayant entraîné la brûlure de deux agents de maintenance	Accident électrique d'un convertisseur	Base de données ARIA
Rupture de pale	08/06/2009	Bollène	Vaucluse	2,3	2009	Oui	Bout de pale d'une éolienne ouvert	Coup de foudre sur la pale	Interne exploitant
Incendie	21/10/2009	Froidfond - Espinassière	Vendée	2	2006	Oui	Incendie de la nacelle	Court-circuit dans transformateur sec embarqué en nacelle ?	Article de presse (Ouest-France) Communiqué de presse exploitant Site FED
Incendie	30/10/2009	Freysenet	Ardèche	2	2005	Oui	Incendie de la nacelle	Court-circuit faisant suite à une opération de maintenance	Base de données ARIA Site FED Article de presse (Le Dauphiné)
Maintenance	20/04/2010	Toufflers	Nord	0,15	1993	Non	Décès d'un technicien au cours d'une opération de maintenance	Crise cardiaque	Article de presse (La Voix du Nord 20/04/2010)
Effondrement	30/05/2010	Port la Nouvelle	Aude	0,2	1991	Non	Effondrement d'une éolienne	Le rotor avait été endommagé par l'effet d'une survitesse. La dernière pale (entière) a pris le vent créant un balourd. Le sommet de la tour a plié et est venu buter contre la base entraînant la chute de l'ensemble.	Interne exploitant
Incendie	19/09/2010	Montjoyer-Rochefort	Drôme	0,75	2004	Non	Emballement de deux éoliennes et incendie des nacelles.	Maintenance en cours, problème de régulation, freinage impossible, évacuation du personnel, survitesse de +/- 60 tr/min	Articles de presse Communiqué de presse SER-FEE

Type d'accident	Date	Nom du parc	Département	Puissance (en MW)	Année de mise en service	Technologie récente	Description sommaire de l'accident et dégâts	Cause probable de l'accident	Source(s) de l'information
Maintenance	15/12/2010	Pouillé-les-Côteaux	Loire Atlantique	2,3	2010	Oui	Chute de 3 m d'un technicien de maintenance à l'intérieur de l'éolienne. L'homme de 22 ans a été secouru par le GRIMP de Nantes. Aucune fracture ni blessure grave.		Interne SER-FEE
Transport	31/05/2011	Mesvres	Saône-et-Loire	-	-	-	Collision entre un train régional et un convoi exceptionnel transportant une pale d'éolienne, au niveau d'un passage à niveau Aucun blessé		Article de presse (Le Bien Public 01/06/2011)

12. Annexe 3 : Glossaire

Les définitions ci-dessous sont reprises de la circulaire du 10 mai 2010. Ces définitions sont couramment utilisées dans le domaine de l'évaluation des risques en France.

Accident : Evénement non désiré, tel qu'une émission de substance toxique, un incendie ou une explosion résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement qui entraîne des conséquences/ dommages vis à vis des personnes, des biens ou de l'environnement et de l'entreprise en général. C'est la réalisation d'un phénomène dangereux, combinée à la présence d'enjeux vulnérables exposés aux effets de ce phénomène.

Cinétique : Vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur aux conséquences sur les éléments vulnérables (cf. art. 5 à 8 de l'arrêté du 29 septembre 2005). Dans le tableau APR proposé, la cinétique peut être lente ou rapide. Dans le cas d'une cinétique lente, les enjeux ont le temps d'être mis à l'abri. La cinétique est rapide dans le cas contraire.

Danger : Cette notion définit une propriété intrinsèque à une substance (butane, chlore...), à un système technique (mise sous pression d'un gaz...), à une disposition (élévation d'une charge...), à un organisme (microbes), etc., de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable » (sont ainsi rattachées à la notion de « danger » les notions d'inflammabilité ou d'explosivité, de toxicité, de caractère infectieux, etc. inhérentes à un produit et celle d'énergie disponible [pneumatique ou potentielle] qui caractérisent le danger).

Efficacité (pour une mesure de maîtrise des risques) ou capacité de réalisation : Capacité à remplir la mission/fonction de sécurité qui lui est confiée pendant une durée donnée et dans son contexte d'utilisation. En général, cette efficacité s'exprime en pourcentage d'accomplissement de la fonction définie. Ce pourcentage peut varier pendant la durée de sollicitation de la mesure de maîtrise des risques. Cette efficacité est évaluée par rapport aux principes de dimensionnement adapté et de résistance aux contraintes spécifiques.

Evénement initiateur : Evénement, courant ou anormal, interne ou externe au système, situé en amont de l'événement redouté central dans l'enchaînement causal et qui constitue une cause directe dans les cas simples ou une combinaison d'événements à l'origine de cette cause directe.

Evénement redouté central : Evénement conventionnellement défini, dans le cadre d'une analyse de risque, au centre de l'enchaînement accidentel. Généralement, il s'agit d'une perte de confinement pour les fluides et d'une perte d'intégrité physique pour les solides. Les événements situés en amont sont conventionnellement appelés « phase pré-accidentelle » et les événements situés en aval « phase post-accidentelle ».

Fonction de sécurité : Fonction ayant pour but la réduction de la probabilité d'occurrence et/ou des effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système. Les principales actions assurées par les fonctions de sécurité en matière d'accidents majeurs dans les installations classées sont : empêcher, éviter, détecter, contrôler, limiter. Les fonctions de sécurité identifiées peuvent être assurées à partir d'éléments techniques de sécurité, de procédures organisationnelles (activités humaines), ou plus généralement par la combinaison des deux.

Gravité : On distingue l'intensité des effets d'un phénomène dangereux de la gravité des conséquences découlant de l'exposition d'enjeux de vulnérabilités données à ces effets.

La gravité des conséquences potentielles prévisibles sur les personnes, prises parmi les intérêts visés à l'article L. 511-1 du code de l'environnement, résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de la vulnérabilité des enjeux potentiellement exposés.

Indépendance d'une mesure de maîtrise des risques : Faculté d'une mesure, de par sa conception, son exploitation et son environnement, à ne pas dépendre du fonctionnement d'autres éléments et notamment d'une part d'autres mesures de maîtrise des risques, et d'autre part, du système de conduite de l'installation, afin d'éviter les modes communs de défaillance ou de limiter leur fréquence d'occurrence.

Intensité des effets d'un phénomène dangereux : Mesure physique de l'intensité du phénomène (thermique, toxique, surpression, projections). Parfois appelée gravité potentielle du phénomène dangereux (mais cette expression est source d'erreur). Les échelles d'évaluation de l'intensité se réfèrent à des seuils d'effets moyens conventionnels sur des types d'éléments vulnérables [ou enjeux] tels que « homme », « structures ». Elles sont définies, pour les installations classées, dans l'arrêté du 29/09/2005. L'intensité ne tient pas compte de l'existence ou non d'enjeux exposés. Elle est cartographiée sous la forme de zones d'effets pour les différents seuils.

Mesure de maîtrise des risques (ou barrière de sécurité) : Ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On distingue parfois :

- les mesures (ou barrières) de prévention : mesures visant à éviter ou limiter la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux
- les mesures (ou barrières) de limitation : mesures visant à limiter l'intensité des effets d'un phénomène dangereux
- les mesures (ou barrières) de protection : mesures visant à limiter les conséquences sur les enjeux potentiels par diminution de la vulnérabilité.

Phénomène dangereux : Libération d'énergie ou de substance produisant des effets, au sens de l'arrêté du 29 septembre 2005, susceptibles d'infliger un dommage à des enjeux (ou éléments vulnérables) vivants ou matérielles, sans préjuger l'existence de ces dernières. C'est une « Source potentielle de dommages »

Potentiel de danger (ou « source de danger », ou « élément dangereux », ou « élément porteur de danger ») : Système (naturel ou créé par l'homme) ou disposition adoptée et comportant un (ou plusieurs) « danger(s) » ; dans le domaine des risques technologiques, un « potentiel de danger » correspond à un ensemble technique nécessaire au fonctionnement du processus envisagé.

Prévention : Mesures visant à prévenir un risque en réduisant la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux.

Protection : Mesures visant à limiter l'étendue ou/et la gravité des conséquences d'un accident sur les éléments vulnérables, sans modifier la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux correspondant.

Probabilité d'occurrence : Au sens de l'article L. 512-1 du code de l'environnement, la probabilité d'occurrence d'un accident est assimilée à sa fréquence d'occurrence future estimée sur l'installation considérée. Elle est en général différente de la fréquence historique et peut s'écarter, pour une installation donnée, de la probabilité d'occurrence moyenne évaluée sur un ensemble d'installations similaires.

Attention aux confusions possibles :

1. Assimilation entre probabilité d'un accident et celle du phénomène dangereux correspondant, la première intégrant déjà la probabilité conditionnelle d'exposition des enjeux. L'assimilation sous-entend que les enjeux

sont effectivement exposées, ce qui n'est pas toujours le cas, notamment si la cinétique permet une mise à l'abri ;

2. Probabilité d'occurrence d'un accident x sur un site donné et probabilité d'occurrence de l'accident x, en moyenne, dans l'une des N installations du même type (approche statistique).

Réduction du risque : Actions entreprises en vue de diminuer la probabilité, les conséquences négatives (ou dommages), associés à un risque, ou les deux. [FD ISO/CEI Guide 73]. Cela peut être fait par le biais de chacune des trois composantes du risque, la probabilité, l'intensité et la vulnérabilité :

- Réduction de la probabilité : par amélioration de la prévention, par exemple par ajout ou fiabilisation des mesures de sécurité
- Réduction de l'intensité : par action sur l'élément porteur de danger (ou potentiel de danger), par exemple substitution par une substance moins dangereuse, réduction des vitesses de rotation, etc.
- réduction des dangers : la réduction de l'intensité peut également être accomplie par des mesures de limitation

La réduction de la probabilité et/ou de l'intensité correspond à une réduction du risque « à la source ».

Réduction de la vulnérabilité : par éloignement ou protection des éléments vulnérables (par exemple par la maîtrise de l'urbanisation, ou par des plans d'urgence).

Risque : « Combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences » (ISO/CEI 73), « Combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité » (ISO/CEI 51).

Scénario d'accident (majeur) : Enchaînement d'événements conduisant d'un événement initiateur à un accident (majeur), dont la séquence et les liens logiques découlent de l'analyse de risque. En général, plusieurs scénarios peuvent mener à un même phénomène dangereux pouvant conduire à un accident (majeur) : on dénombre autant de scénarios qu'il existe de combinaisons possibles d'événements y aboutissant. Les scénarios d'accident obtenus dépendent du choix des méthodes d'analyse de risque utilisées et des éléments disponibles.

Temps de réponse (pour une mesure de maîtrise des risques) : Intervalle de temps requis entre la sollicitation et l'exécution de la mission/fonction de sécurité. Ce temps de réponse est inclus dans la cinétique de mise en œuvre d'une fonction de sécurité, cette dernière devant être en adéquation [significativement plus courte] avec la cinétique du phénomène qu'elle doit maîtriser.

Les définitions suivantes sont issues de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement :

Aérogénérateur : Dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité, composé des principaux éléments suivants : un mât, une nacelle, le rotor auquel sont fixées les pales, ainsi que, le cas échéant, un transformateur

Survitesse : Vitesse de rotation des parties tournantes (rotor constitué du moyeu et des pales ainsi que la ligne d'arbre jusqu'à la génératrice) supérieure à la valeur maximale indiquée par le constructeur.

Enfin, quelques sigles utiles employés dans le présent guide sont listés et explicités ci-dessous :

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

SER : Syndicat des Energies Renouvelables

FEE : France Energie Eolienne (branche éolienne du SER)

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

EDD : Etude de dangers

APR : Analyse Préliminaire des Risques

ERP : Etablissement Recevant du Public

13. Annexe 4 : Bibliographie et références utilisées

- L'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience ;
- NF EN 61400-1 Eoliennes - Partie 1 : Exigences de conception, Juin 2006 ;
- Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement ;
- Arrêté du 29 Septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation ;
- Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 Juillet 2003 ;
- Arrêté du 29 Septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation ;
- Base de données ARIA - INERIS ;
- Guidelines on the environmental risks of wind turbines in the Netherlands, Braam, 2004, 6p. ;
- HandboekRisicozoneringWindturbines, SenterNovem, 2005, 190p;
- COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS, "Guidelines for Quantitative Risk Assessment, The Hague 1999, (Purple Book);
- Guide de l'étude de dangers INERIS/FEE version de décembre 2011.

14. Annexe 5 : Etude balistique



NOTE DE CALCUL BALISTIQUE
PARC EOLIEN VOULPAIX
AEROGENERATEUR SIEMENS SWT 2,3-113

n° dossier : 12030018
code analytique :

	Nom	Fonction	Date	signature
Rédaction	Sylvain MONTREAU	Réalisation de l'étude	10/04/2012	
Validation	Sylvain LECIGNE	Responsable département développement durable des entreprises	10/04/2012	

airele nord
ZAC du Chevalement
Rue des Molettes
59286 Roost-Warendin
Tél : 03 27 97 36 39
Fax : 03 27 97 36 11
Contact.nord@airele.com

airele ouest
ZI de Nétreville
763 rue de cocherel
27000 Évreux
Tél : 02 32 32 53 28
Fax : 02 32 32 99 13
Contact.ouest@airele.com
Antenne Bretagne (Dinan)
Tél/fax : 02 96 85 39 46

airele est
61 chemin du Barrage
51000 Châlons-en-champagne
Tél : 03 26 22 71 46
Fax : 03 26 64 73 32
Contact.est@airele.com

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1. Principe de calcul	2
1.1. Introduction.....	2
1.2. Description de l'objet projeté.....	2
1.2.1. Description d'une pale d'éolienne.....	2
1.2.2. Aérodynamisme	3
1.2.3. Description de l'objet projeté	5
1.3. Modélisation balistique	6
1.3.1. Définition du système	6
1.3.2. Hypothèses de calcul	6
1.3.3. Modélisation de la trajectoire.....	6
1.4. Résolution du système :	7
Chapitre 2. Calculs balistiques	8
2.1. Scénario de projection d'une pale complète	8
2.1.1. Données d'entrée du calcul.....	8
2.1.2. Résultats	9
2.2. Scénario de projection d'un fragment de pale	10
2.2.1. Données d'entrée du calcul.....	10
2.2.2. Résultats	10
Chapitre 3. Bibliographie	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Schéma aérogénérateur SIEMENS SWT 2,3-113.....	2
Figure 2 Exemple de profils [4].....	3
Figure 3 Photographie d'une pale SIEMENS.....	3
Figure 4 Bilan des forces aérodynamiques.....	3
Figure 5 Coefficient de pénétration dans l'air C_x selon la forme de l'objet	4
Figure 6 Coefficient aérodynamique du profil NACA2412	4
Figure 7 Rotation de la pale au départ de sa projection	4
Figure 8 Exemples de photographies d'accidents de projection.....	5
Figure 9 Schéma d'une éolienne dans le modèle balistique.....	6
Figure 10 Graphique de la distance de projection en valeur absolue.....	7
Figure 11 Graphique de la distance de projection	7
Figure 12 Distance parcourue pour une projection de pale selon α sans frottements	9
Figure 13 Distance maximale parcourue par la pale à $\alpha=4,33$ rad.....	9
Figure 14 Distance parcourue pour une projection de fragment de pale selon α sans frottements.....	10
Figure 15 Distance maximale parcourue par le fragment à $\alpha=4,021$ rad	11

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Probabilités de défaillance [10]	5
Tableau 2 Hypothèses retenues pour les objets projetés.....	5
Tableau 3 Données d'entrées, scénario projection de pale.....	8
Tableau 4 Trajectoire balistique pour une pale complète avec $\alpha=4,33$ rad et $\Omega=18$ tr/min	10
Tableau 5 Données d'entrées, scénario projection de fragment	10
Tableau 6 Trajectoire balistique pour un fragment de pale avec $\alpha=4,021$ rad et $\Omega=18$ tr/min	11

1.1. INTRODUCTION

L'étude de dangers fait apparaître dans le cadre de projet éolien un risque de projection de fragments de pale ou de pale entière. Les causes sont nombreuses : foudre, rupture de l'attache moyeu pale suite à une situation de survitesse, rafale de vent violente soudaine, etc.

Cette note de calcul balistique a pour objet de calculer la longueur du périmètre de risque lié à ces situations de dangers.

1.2. DESCRIPTION DE L'OBJET PROJETE

1.2.1. DESCRIPTION D'UNE PALE D'EOLIENNE



Figure 1 Schéma aérogénérateur SIEMENS SWT 2,3-113

Les pales, conçues pour allier solidité, légèreté, comportement aérodynamique et émissions acoustiques minimales, utilisent une construction sandwich en matériau composite époxy/ fibres de verres.

Elles font l'objet d'une certification-type selon le référentiel IEC 61400 incluant des tests exhaustifs visant à reproduire avec des facteurs de sécurité importants les contraintes statiques, dynamiques et les phénomènes de fatigue auxquels seront soumis les pales sur leur durée de vie

Chapitre 1. PRINCIPE DE CALCUL

Le profil aérodynamique d'une pale correspond à la forme que possède la pale vue en coupe. Ce profil varie dans la longueur de la pale : sphérique à la base (l'attache au moyeu est sphérique), profil type aile d'avion vers l'extrémité (voir figure 2 et 3). La longueur de la corde varie également sur toute la longueur.

Les pales sont de plus vrillées de manière à tenir compte de la vitesse de rotation différente et ainsi optimiser l'angle d'attaque par rapport au flux d'air incident.

Voici des exemples de profils :

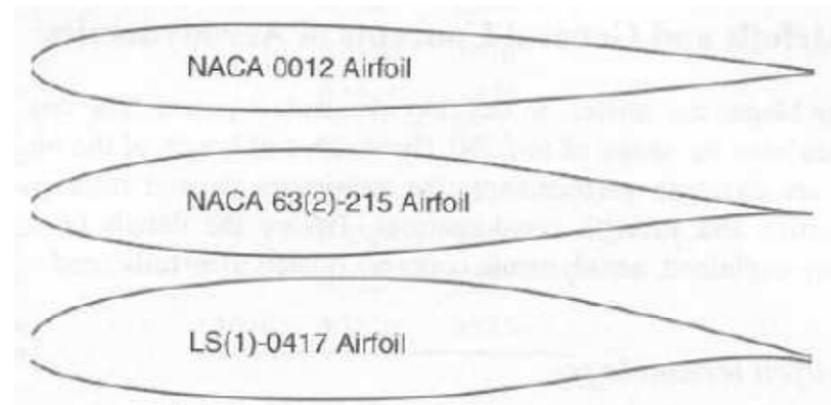


Figure 2 Exemple de profils [4]



Figure 3 Photographie d'une pale SIEMENS

Les pales ont des formes complexes permettant d'optimiser le rendement aérodynamique en fonctionnement normal de l'éolienne.

1.2.2. AERODYNAMISME

Nous nous intéressons au comportement de la pale en vol libre.

Par sa forme, la pale est soumise à différentes forces, notamment des forces aérodynamiques :

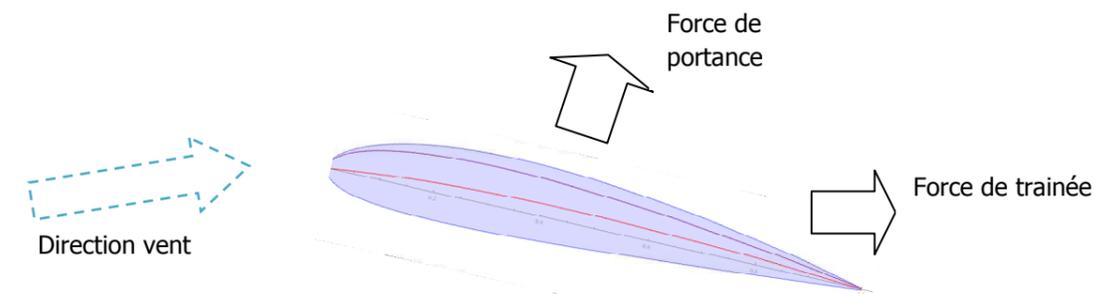


Figure 4 Bilan des forces aérodynamiques

Les forces de trainée et de portance peuvent être calculées en régime laminaire par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Force de trainée} & F_{\text{trainée}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2 \\ \text{Force de portance} & F_{\text{portance}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_z \cdot V^2 \end{aligned}$$

Avec :

- C_x et C_z , les coefficients de pénétration dans l'air ;
- S , la surface de frottement avec l'air ;
- V , la vitesse relative de l'objet.

Les coefficients de pénétration C_x et C_z dépendent de la forme de l'objet :

Coefficients de pénétration dans l'air c_x

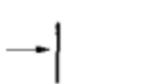
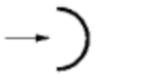
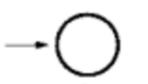
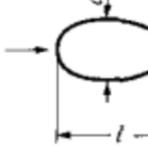
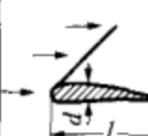
Forme du solide	c_x	Forme du solide	c_x
 Disque, plaque	1,1	 Barre cylindrique	1,0
 Demi-sphère creuse, parachute	1,4	$Re < 200\ 000$ $Re > 450\ 000$	0,35
 Sphère	0,45 0,20	 Plaque longue	0,78 0,66
$Re < 200\ 000$ $Re > 250\ 000$		$l : d = 30$ $Re = 500\ 000$ $Re = 200\ 000$	
 Corps aérodynamique profilé	0,05	 Tronçon d'aile	0,2 0,1 0,08 0,2
$l : d = 6$		$l : d = 18$ $l : d = 8$ $l : d = 5$ $l : d = 2$ } $Re = 10^6$ $Re = 2 \cdot 10^5$	

Figure 5 Coefficient de pénétration dans l'air C_x selon la forme de l'objet

Les coefficients aérodynamiques dépendent également du frottement de l'air sur les surfaces de l'objet. Pour un profil type NACA 2412, les coefficients de trainée et de portance dépendent notamment du régime de l'écoulement visqueux (Re) :

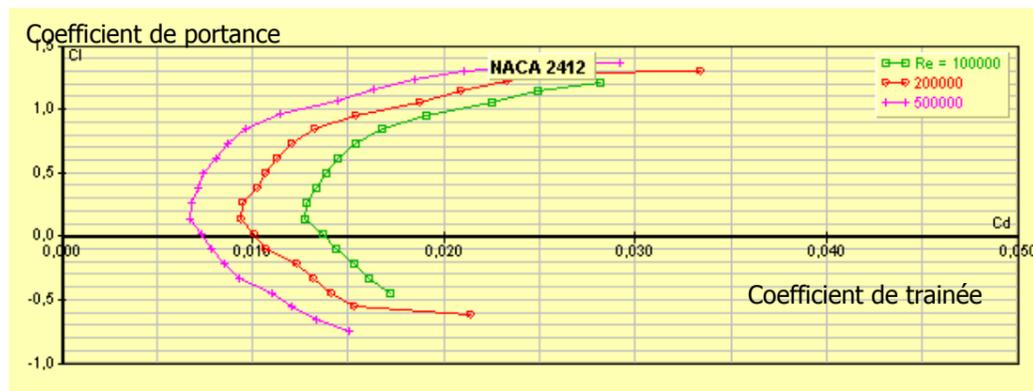


Figure 6 Coefficient aérodynamique du profil NACA2412

De nombreuses considérations compliquent la modélisation et multiplient les variables d'entrée du modèle :

- formes complexes de la pale (profil variable, vrillage, longueur de corde et épaisseur variables) ;
- coefficients de pénétration dans l'air variables selon la forme et le régime d'écoulement ;
- vitesse relative de l'air variable selon la vitesse de l'objet et force du vent ;
- turbulence lors d'écoulement visqueux rapide ;

Pour ces considérations, il est difficile de prévoir le mouvement propre de la pale lors de son vol.

En effet les forces de portances amèneront la pale dans un mouvement de rotation.

Cet effet serait augmenté du fait du vrillage de la pale. Cette rotation changera à chaque instant la position de la pale face au vent. De ce fait, les paramètres de coefficients de pénétration, de surface exposée et de vitesse seraient également modifiés. Or tous ces paramètres permettent d'évaluer les forces de portance, on se retrouve ainsi avec des équations différentielles complexes.

Dans sa rotation propre, la pale se retrouvera avec l'intrados ou l'extrados face au vent. Cette situation provoquera une force de trainée très importante vue la grande surface exposée.

Avant projection, la pale est en rotation autour du rotor. La vitesse de la pale est différente selon sa longueur. Lors du bris de pale et de sa projection, la pale sera soumise à une rotation selon la figure ci-dessous :

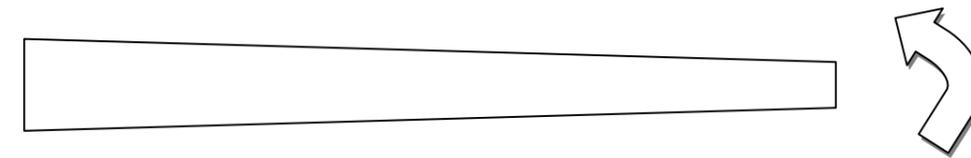


Figure 7 Rotation de la pale au départ de sa projection

Le vol libre de la pale démarrera avec une énergie cinétique impulsée par la rotation du rotor, cette énergie sera progressivement réduite par les différentes forces de frottement. L'énergie potentielle due à la hauteur de la pale au départ de son vol libre sera transformée en énergie cinétique.

Sans forces de frottements, la trajectoire normale balistique d'un objet est parabolique [6]. En tenant compte des forces de frottements et de portance, la trajectoire devient complexe avec différentes rotations relatives de la pale.

Afin de rendre compte de ces phénomènes de frottement/portance sans pouvoir modéliser cette trajectoire complexe, nous avons fait le choix de fixer une surface moyenne, un coefficient aérodynamique moyen.

1.2.3. DESCRIPTION DE L'OBJET PROJETE



Figure 8 Exemples de photographies d'accidents de projection

Le NOVEM [2] donne l'inventaire des accidents survenus sur le parc éolien allemand. Cette base de donnée, regroupant 1566 éoliennes pour un total d'environ 13000 années de fonctionnement (en tenant compte du nombre de machines et de leurs ancienneté), a permis de recenser 43 accidents, soit 0,33 incidents critiques pour 100 ans de fonctionnement.

La fréquence d'accidents a été calculée sur un échantillon de 200 accidents au Pays Bas, Allemagne et Danemark pour un parc d'éolienne de 42 889 machines années (nombre de machines × années de fonctionnement) pour une période de 1984 à 2000.

Défaillance	Probabilité de défaillance (95% de confiance)	Distance observée	maximale
Bris pale complète	$8,4 \cdot 10^{-4}$	150 m	
<i>A vitesse nominale</i>	$4,2 \cdot 10^{-4}$		
<i>En vitesse de freinage</i>	$4,2 \cdot 10^{-4}$		
<i>En survitesse</i>	$5,0 \cdot 10^{-6}$		
Bris morceau de pale	$2,6 \cdot 10^{-4}$	500 m	

Tableau 1 Probabilités de défaillance [10]

La projection de pale complète atteint des distances bien inférieures à un fragment de pale dans la réalité observée. Ce qui est logique vu les surfaces importantes de prise à l'air.

Il n'existe actuellement pas de bases de données officielles qui recensent la taille des fragments suite aux accidents provoquant la rupture de pale. Ces ruptures sont dues à la foudre, aux vents violents, à des collisions avec aéronefs, etc. Les causes sont variées et provoquent des ruptures différentes. Comme le matériau de la pale est un composite à base de fibre de verre, les ruptures sont des déchirures, visibles sur les photos de la figure 8.

Pour ces raisons, nous avons modélisé les deux cas de figure extrêmes que sont la projection de pale complète et la projection d'un morceau de petite taille. Dans le premier cas, la pale présente une surface de frottement à l'air importante et un poids également important. Dans le deuxième cas, l'objet par sa petite taille, présente une résistance à l'air plus faible mais il est projeté en bout de pale à une vitesse de rotation plus importante.

Les hypothèses retenues pour les objets projetés sont les suivantes :

Objet projeté	Dimension	Poids	Position du centre de gravité	Surface moyenne retenue pour le calcul de résistance à l'air.	Coefficient de pénétration moyen retenue pour le calcul de résistance à l'air.
Pale complète	longueur 55m	11,3 t	16,5m du moyeu	7,84 m ²	0,5
Fragment de bout de pale	Longueur de 2m	110kg	50% de la longueur	1,055 m ²	0,5

Tableau 2 Hypothèses retenues pour les objets projetés

1.3. MODELISATION BALISTIQUE

1.3.1. DEFINITION DU SYSTEME

On considère la direction Oy comme étant la direction du vent.

La rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre.

On modélise la trajectoire d'un objet, une pale ou un fragment de pale suite à une défaillance de l'éolienne qui conduit à une rupture en rotation.

A l'instant de la projection, l'objet possède une vitesse de rotation Ω .

Soient les paramètres suivants :

- H : hauteur du moyeu ;
- x,y,z : coordonnées du centre de gravité de l'objet pendant sa trajectoire à l'instant t ;
- t0 : instant initial (rupture entraînant la projection) ;
- α : angle de la pale à t0 par rapport à la direction Ox (sens positif dans le sens des aiguilles d'une montre) ;
- Ω : vitesse radiale à t0 en tr/min ou en rad/s ;
- R : longueur du centre de gravité de l'objet du centre du moyeu ;

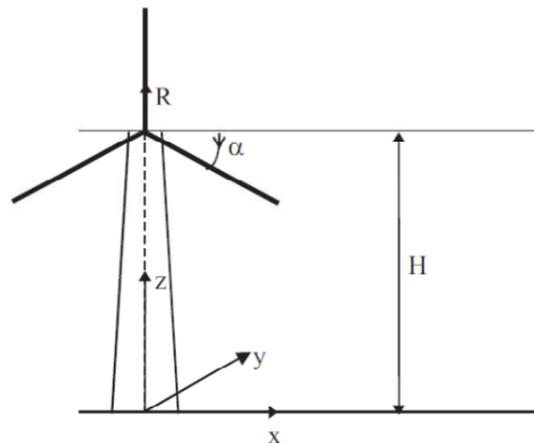


Figure 9 Schéma d'une éolienne dans le modèle balistique

1.3.2. HYPOTHESES DE CALCUL

- L'écoulement de l'air autour de l'objet pendant sa trajectoire est laminaire ;

- On retient des surfaces moyennes et coefficients aérodynamiques moyens ;
- On néglige les rotations propres de l'objet pendant son vol libre ;
- On néglige les forces de Coriolis et les forces centrifuges.

Toutes ces hypothèses participent à surestimer les distances de projection dans les calculs balistiques.

1.3.3. MODELISATION DE LA TRAJECTOIRE

Pour le calcul de la trajectoire, on considère que l'objet est soumis à son poids, aux frottements de l'air lors de son vol (force de traînée) et la force de frottement liée au vent. Les lois de Newton permettent de conclure que l'objet est soumis aux forces suivantes :

- Le poids P est une force constante verticale dirigée vers le bas qui dépend de la masse m de l'objet :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}$$
- La force de frottement de l'air liée à la vitesse de l'objet : $\vec{F}_{\text{frottement}} = -k \cdot v \cdot \vec{v}$, (modèle de frottement retenue pour un frottement laminaire)
- La résistance du vent liée à sa vitesse (v_{vent}) dirigé selon Oy entraîne une vitesse relative de l'objet selon l'axe Oy. Cette résistance est incluse dans $\vec{F}_{\text{frottement}}$.

Le principe fondamental de la dynamique donne :

$$m \cdot \vec{a} = \vec{P} + \vec{F}_{\text{frottement}}$$

$$\dot{x}(t) = v_x$$

$$\dot{y}(t) = v_y + v_{\text{vent}}$$

$$\dot{z}(t) = v_z$$

Les composantes de l'accélération dans le repère de la figure 1 sont donc :

$$m \cdot \ddot{x}(t) = -k_x \cdot v \cdot \dot{x}(t) \quad (1)$$

$$m \cdot \ddot{y}(t) = -k_y \cdot v \cdot (\dot{y}(t) - v_{\text{vent}})$$

$$m \cdot \ddot{z}(t) = -m \cdot g + k_z \cdot v \cdot \dot{z}(t)$$

Avec

$$v(t) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

En tenant compte des aspects géométriques, la vitesse du centre de gravité de l'objet pendant sa rotation est $V = \Omega \cdot R$

Nous partons de l'hypothèse que la direction du vent est aléatoire. De cette manière, nous étudions le système que dans le plan xOz et nous négligeons l'effet de recul dans la direction Oy.

Calculs aérodynamiques

En aérodynamique, la constante k se calcul de la manière suivante :

$$k = A \cdot C \cdot \rho / 2$$

Avec :

- ρ : masse volumique de l'air
- C : coefficient de pénétration dans l'air ou (dépendant de la géométrie de l'objet)
- A : surface frontale qui résiste à l'écoulement de l'air

1.4. RESOLUTION DU SYSTEME :

Les conditions initiales sont les suivantes :

$$\begin{aligned} x(0) &= R_z \cos \alpha, & y(0) &= 0, & z(0) &= H - R_z \sin \alpha, \\ \dot{x}(0) &= -\Omega R_z \sin \alpha, & \dot{y}(0) &= 0, & \dot{z}(0) &= -\Omega R_z \cos \alpha, \end{aligned}$$

RESOLUTION ALGEBRIQUE DU SYSTEME SANS TENIR COMPTE DES FROTTEMENTS DE L'AIR :

Sans tenir compte des frottements de l'air, le système d'équation (1) peut se résoudre de manière algébrique. Le système d'équations (1) en tenant compte des conditions initiales, devient :

$$\begin{aligned} x(t) &= R_z \cos \alpha - \Omega R_z t \sin \alpha \\ y(t) &= 0 \\ z(t) &= H - R_z \sin \alpha - \Omega R_z t \cos \alpha - \frac{gt^2}{2} \end{aligned}$$

La solution de l'équation $z(t_i)=0$ permet d'évaluer $x(t_i)$ avec t_i instant où l'objet touche le sol.

$$t_i = -\frac{\Omega R_z \cos \alpha}{g} + \sqrt{\frac{2}{g} \left(H - R_z \sin \alpha + \frac{\Omega^2 R_z^2 \cos^2 \alpha}{2g} \right)}$$

Nous calculons ainsi la distance de projection x . Celle-ci dépend de l'angle de départ (α), de la vitesse de rotation du rotor (Ω) et de considérations aérodynamiques.

RESOLUTION NUMERIQUE DU SYSTEME EN TENANT COMPTE DES FROTTEMENTS DE L'AIR :

Une méthode numérique basée sur la méthode d'Euler a été utilisée pour résoudre les équations différentielles (1).

C'est une méthode itérative de calcul qui utilise une suite. La vitesse et l'accélération sont calculées à intervalle de temps Δt régulier : $t_{i+1} = \Delta t + t_i$

La valeur z_{i+1} est déterminée en ajoutant Δz_i à la valeur z_i .

L'algorithme de calcul est le suivant :

$$\begin{aligned} z_{i+1} &= z_i + \Delta z_i = z_i + \Delta t \times dz_i/dt \\ &\text{et de la même manière :} \\ x_{i+1} &= x_i + \Delta x_i = x_i + \Delta t \times dx_i/dt \end{aligned}$$

avec $dz_i/dt = v_z$ et $dx_i/dt = v_x$ à l'instant i .

Plus Δt est petit, plus le calcul est précis.

ETUDE DES DISTANCES DE PROJECTION

Les distances de projection $x(\alpha)$ et $r = \sqrt{x^2}$ sont modélisées ci-dessous en fonction de l'angle de départ α pour une vitesse de rotation Ω donné :

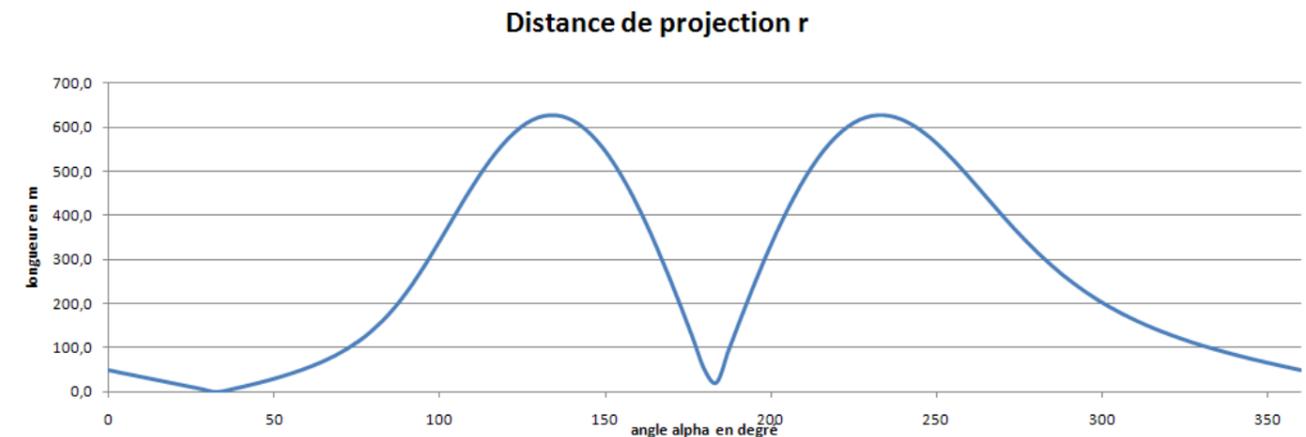


Figure 10 Graphique de la distance de projection en valeur absolue

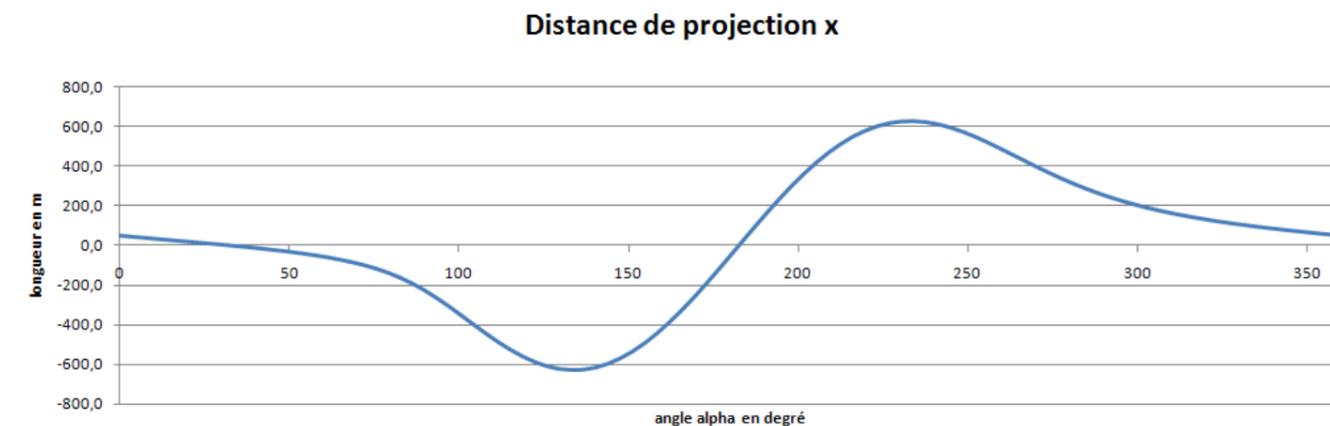


Figure 11 Graphique de la distance de projection

L'étude de cette distance $x(\alpha)$ montre que pour une distance x donné, il existe 2 angles possibles de projection α_1 et α_2 .

Chapitre 2. CALCULS BALISTIQUES

2.1. SCENARIO DE PROJECTION D'UNE PALE COMPLETE

2.1.1. DONNEES D'ENTREE DU CALCUL

Les données fournies par SIEMENS et utilisées dans le calcul balistique sont les suivantes :

CARACTERISTIQUES EOLIENNES	
Modèle éolienne	SIEMENS SWT 2,3-113
Puissance (MW)	2,3
Vitesse max Omega (rad/s)	1,88 (18tr/min)
Vitesse vent (m/s)	12
Hauteur mat (m)	122,5
Longueur pale (m)	55
Diamètre rotor (m)	113
Poids d'une pale (kg)	11300
R (distance centre de gravité de la pale au centre du moyeu) (m)	16,5
g	9,81

Tableau 3 Données d'entrées, scénario projection de pale

2.1.2. RESULTATS

Le calcul balistique réalisé sans tenir compte des frottements de l'air donne les résultats de la figure 12 pour une vitesse de rotation de 18tr/min et selon des angles α variables.

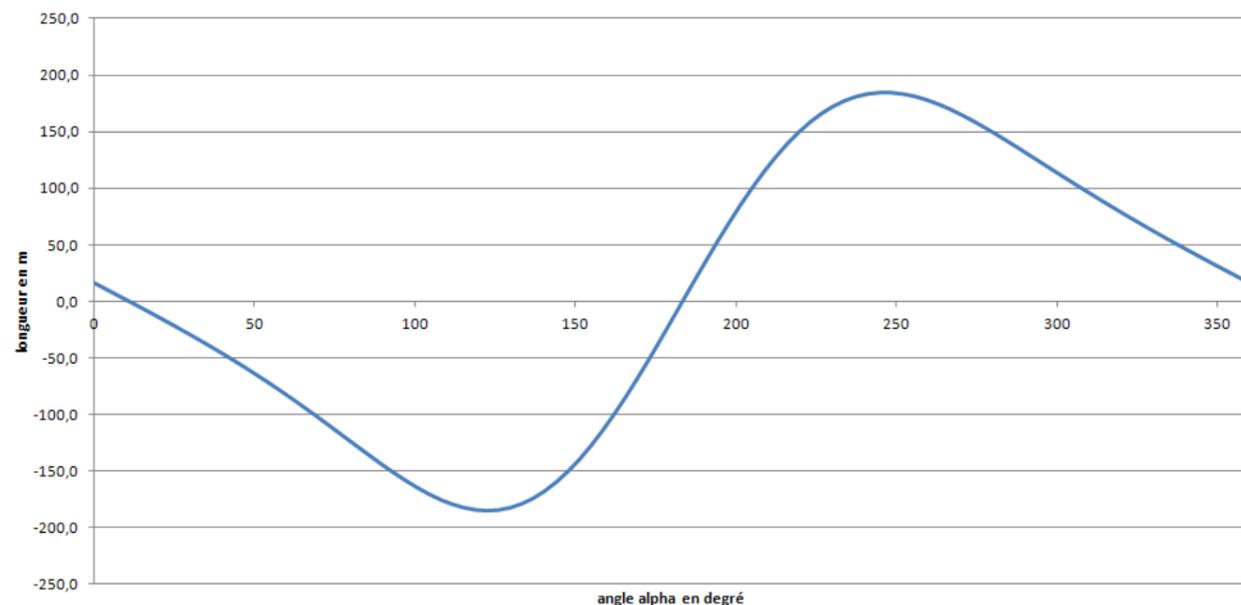


Figure 12 Distance parcourue pour une projection de pale selon α sans frottements

L'angle α qui donne la distance maximale de projection est $\alpha=4,33$ rad.

La résolution numérique est réalisée avec $\alpha= 4,33$ rad et $\Omega=18$ tr/min en tenant compte des frottements de l'air. La trajectoire balistique est calculée et dessinée en figure 13.

La distance maximale atteinte par le centre de gravité de la pale est de **180 m**.

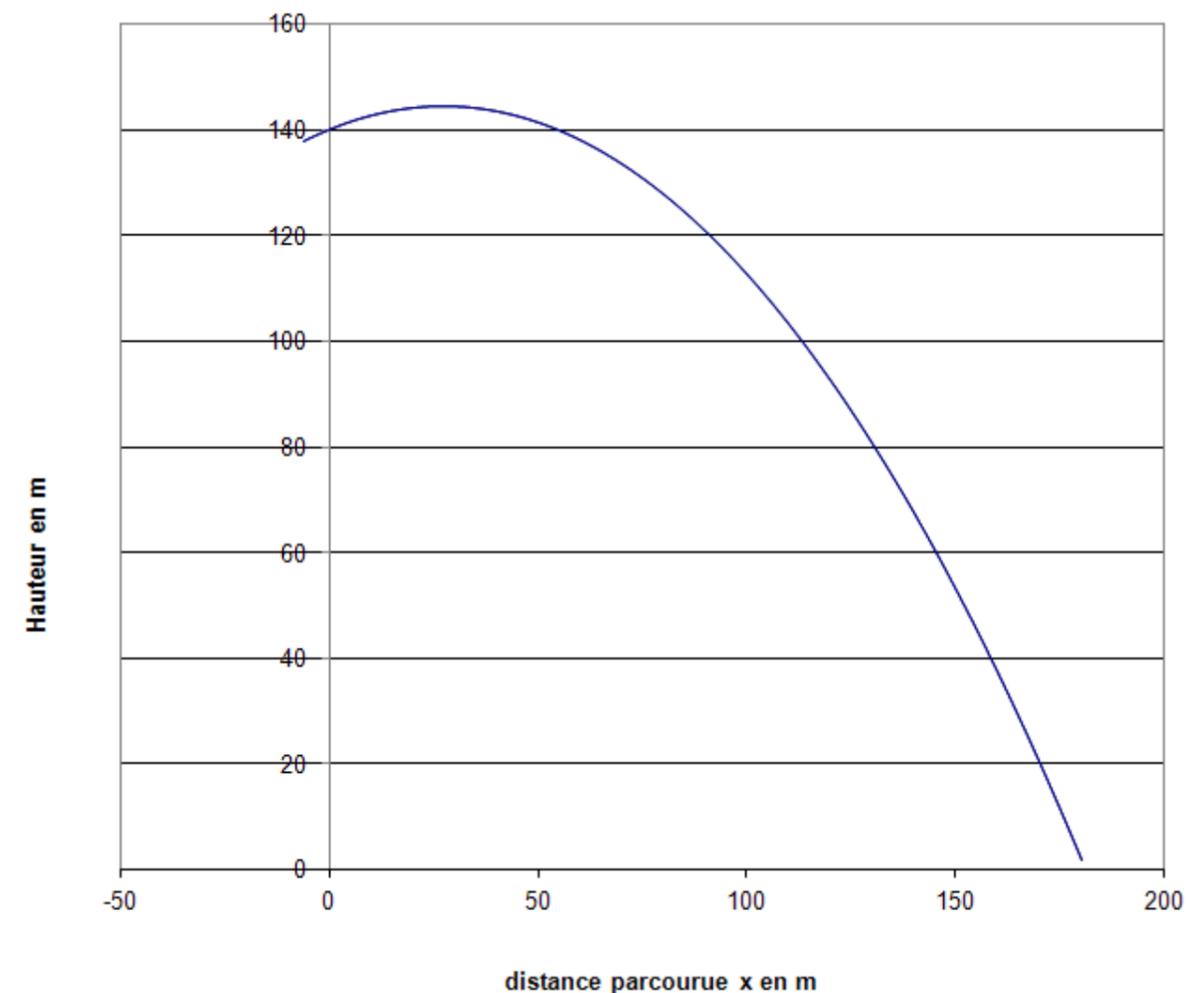


Figure 13 Distance maximale parcourue par la pale à $\alpha=4,33$ rad

La trajectoire pour une pale complète avec $\alpha=4,43$ rad et $\Omega=18$ tr/min est calculée dans le tableau ci-dessous.

Time en s	v_x en m/s	v_z en m/s	V en m/s	X en m	Z en m
0	28,91769	11,44932	31,10177	-6,07406	137,8413
0,5	28,82212	6,506486	29,54741	8,360899	142,3303
1	28,73163	1,581058	28,7751	22,74934	144,3522
1,5	28,64378	-3,32878	28,83656	37,09319	143,9152
2	28,55602	-8,22358	29,71655	51,39314	141,0271
2,5	28,46585	-13,1026	31,3366	65,64861	135,6956
3	28,37106	-17,964	33,58008	79,85783	127,9289
3,5	28,26983	-22,8049	36,32142	94,01806	117,7367
4	28,16072	-27,6219	39,44609	108,1257	105,13
4,5	28,04269	-32,4111	42,85874	122,1765	90,1218

5	27,91498	-37,1685	46,48379	136,166	72,7269
5,5	27,7771	-41,8899	50,26262	150,089	52,9623
6	27,62875	-46,5712	54,15	163,9404	30,84703
6,5	27,46978	-51,2082	58,11084	177,7151	6,402185
6,6	27,40613	-51,975	58,75799	180,4149	1,622473

Tableau 4 Trajectoire balistique pour une pale complète avec $\alpha=4,33$ rad et $\Omega=18$ tr/min

2.2. SCENARIO DE PROJECTION D'UN FRAGMENT DE PALE

2.2.1. DONNEES D'ENTREE DU CALCUL

Les données fournies par SIEMENS et utilisées dans le calcul balistique sont les suivantes :

CARACTERISTIQUES EOLIENNES

Modèle éolienne	SIEMENS SWT 2,3-113
Puissance (MW)	2,3
Vitesse max Omega (rad/s)	1,88 (18tr/min)
Vitesse vent (m/s)	12
Hauteur mat (m)	122,5
Longueur fragment (m)	2
Diamètre rotor (m)	113
Poids fragment (kg)	110
R (distance centre de gravité du fragment au moyeu) (m)	55,5
g	9,81

Tableau 5 Données d'entrées, scénario projection de fragment

2.2.2. RESULTATS

Le calcul balistique réalisé sans tenir compte des frottements de l'air donne les résultats de la figure 14 pour une vitesse de rotation de 18tr/min et selon des angles α variables.

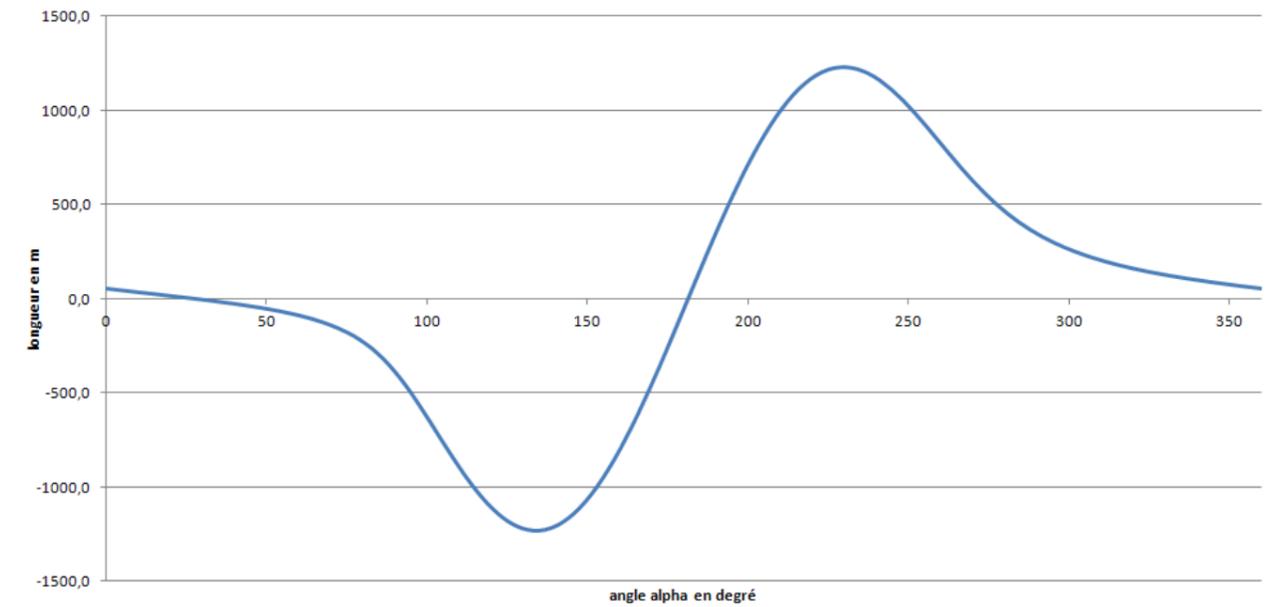


Figure 14 Distance parcourue pour une projection de fragment de pale selon α sans frottements

L'angle α qui donne la distance maximale de projection est $\alpha=4,021$ rad.

La résolution numérique est réalisée avec $\alpha=4,021$ rad et $\Omega=18$ tr/min en tenant compte des frottements de l'air. La trajectoire balistique est calculée et dessinée en figure 15.

La distance maximale atteinte par le centre de gravité du fragment de pale est de **399 m**.

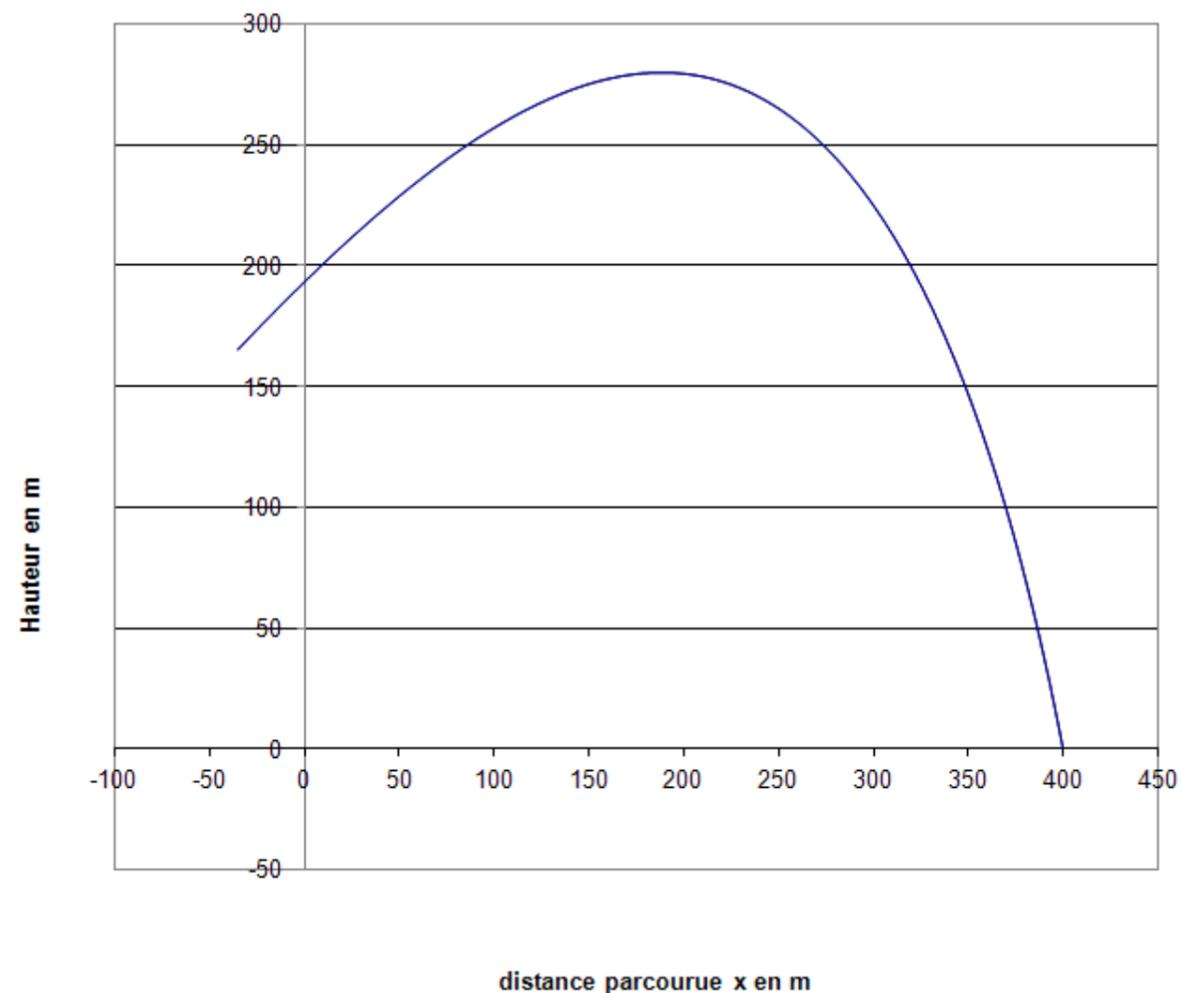


Figure 15 Distance maximale parcourue par le fragment à $\alpha=4,021$ rad

La trajectoire pour un fragment de pale avec $\alpha=4,021$ rad et $\Omega=18$ tr/min est calculée dans le tableau ci-dessous.

Time en s	v_x en m/s	v_z en m/s	V en m/s	X en m	Z en m
0	80,60727	66,68413	104,615	-35,377	165,2635
0,5	68,22289	51,53388	85,49915	1,830509	194,818
1	59,6565	40,15805	71,91361	33,80036	217,741
1,5	53,35601	31,01184	61,71384	62,05349	235,5334
2	48,52017	23,29613	53,82301	87,52253	249,1104
2,5	44,6849	16,54969	47,65115	110,8238	259,0719
3	41,55781	10,48653	42,86046	132,3845	265,8309
3,5	38,94194	4,921451	39,2517	152,5094	269,6829
4	36,69712	-0,26725	36,6981	171,4192	270,8465
4,5	34,71933	-5,15784	35,10036	189,2733	269,4902
5	32,92959	-9,79696	34,35606	206,1855	265,7515
5,5	31,26811	-14,2077	34,34461	222,2349	259,7504
6	29,69099	-18,396	34,92805	237,4747	251,5994
6,5	28,16797	-22,3574	35,96231	251,9395	241,4111
7	26,68029	-26,0816	37,3107	265,6515	229,3013
7,5	25,21835	-29,5575	38,85369	278,6262	215,3916
8	23,77937	-32,7759	40,49343	290,8756	199,8082
8,5	22,36523	-35,7317	42,15402	302,4118	182,6813
9	20,98065	-38,4247	43,77949	313,2482	164,1422
9,5	19,6317	-40,8592	45,33073	323,4013	144,3212
10	18,32476	-43,044	46,78233	332,8904	123,3454
10,5	17,06576	-44,9917	48,11958	341,7381	101,3365
11	15,85974	-46,7172	49,33587	349,9694	78,40928
11,5	14,71063	-48,2373	50,43054	357,612	54,67065
12	13,62112	-49,5697	51,40712	364,695	30,2189
12,5	12,59276	-50,7324	52,27188	371,2484	5,143381
13,15	12,42742	-50,7656	52,2646	399	0,070599

Tableau 6 Trajectoire balistique pour un fragment de pale avec $\alpha=4,021$ rad et $\Omega=18$ tr/min

Chapitre 3. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Données SIEMENS
- [2] HandboekRisicozoneringWindturbines, SenterNovem, 2005, 190p.
- [3] Base ARIA, MEDDTL, 15/04/2011 : Inventaire des accidents d'éoliennes.
- [4] Technologie éolienne, Christian Masson, Département de génie mécanique
École de technologie supérieure, 2011
- [5] Thèse université Paris Est, laboratoire MSME, NGUYEN Quoc Bao, fiabilité des installations industrielles sous impact de fragments de structures – Effet Domino, mai 2009
- [6] Traités de balistique,
- [7] UIUC Airfoil Coordinates Database : http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html