

# ÉTUDE DE DANGER RÉSUMÉ NON TECHNIQUE

## ***OEKOSTROUM HËLZEN***



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2. L'ÉOLIENNE DE HËLZEN</b>	<b>4</b>
<b>2.1 DÉFINITION D'UN PARC ÉOLIEN</b>	<b>4</b>
<b>2.2 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROJET "OEKOSTROUM HËLZEN"</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1 ENVIRONNEMENT HUMAIN</b>	<b>5</b>
<b>2.2.2 ENVIRONNEMENT NATUREL</b>	<b>5</b>
<b>3. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES</b>	<b>6</b>
<b>3.1 DÉFINITION DU DOMAINE DE L'ÉTUDE</b>	<b>7</b>
<b>3.2 ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES RISQUES</b>	<b>7</b>
<b>3.3 ANALYSE DÉTAILLÉE DES RISQUES</b>	<b>8</b>
<b>3.3.1 MÉTHODOLOGIE ET DÉFINITIONS</b>	<b>8</b>
<b>3.3.2 LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE DÉTAILLÉE ANALYSE DES RISQUES</b>	<b>10</b>
<b>3.3.2.1 CHUTE DE GLACE</b>	<b>10</b>
<b>3.3.2.2 EFFONDREMENT DE L'ÉOLIENNE</b>	<b>11</b>
<b>3.3.2.3 CHUTE DE L'ÉLÉMENTS DE LA PALE DE L'ÉOLIENNE</b>	<b>12</b>
<b>3.3.2.4 PROJECTIONS DE PALES OU DE FRAGMENTS DE PALES</b>	<b>13</b>
<b>3.3.2.5 PROJECTION DE GLACE</b>	<b>14</b>
<b>3.4 PRIORISATION DES SCÉNARIOS D'ACCIDENT EN FONCTION DE L'ÉVALUATION DE LEUR PROBABILITÉ D'OCCURRENCE, DE LA GRAVITÉ DE LEURS CONSÉQUENCES ET DE LEUR CINÉTIQUE D'ÉVOLUTION</b>	<b>16</b>
<b>3.4.1 RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE DÉTAILLÉE DES RISQUES</b>	<b>16</b>
<b>3.4.2 MATRICE DES RISQUES</b>	<b>16</b>
<b>4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES MESURES D'AMÉLIORATION PERMETTANT DE RÉDUIRE LES RISQUES</b>	<b>17</b>
<b>4.1 DÉFINITIONS</b>	<b>17</b>
<b>4.2 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES D'AMÉLIORATION</b>	<b>17</b>
<b>5. CARTOGRAPHIE D'ENSEMBLE</b>	<b>18</b>
<b>6. CONCLUSION</b>	<b>20</b>

Mises à jour :

Version	Date	Modifications
1.0	11.12.2024	Elaboration d'un document

## 1. INTRODUCTION

L'éolienne de Hëlzen est située sur le territoire de la commune Wintger doit comprendre une éolienne. La hauteur prévue du moyeu de l'éolienne est, selon le fabricant, comprise entre 162m et 179m. L'exploitation d'une éolienne pouvant comporter des risques, l'objectif de cette étude est de fournir un aperçu des risques potentiels et de définir des mesures pour les réduire. Le donneur d'ordre pour l'étude du projet « Oekostroum Hëlzen » est la Société EMCA de Dickweiler.

Le rapport comprend les points suivants :

- Méthodologie de l'analyse des risques ;
- Une analyse des risques potentiels qui peuvent survenir pendant l'exploitation d'un parc éolien ;
- Mesures de sécurité visant à réduire ces risques ;
- Une cartographie synthétique.



Carte 1 : Carte des lieux d'implantation prévus pour l'éolienne

(Source : EMCA)

## 2. L'ÉOLIENNE DE HËLZEN

### 2.1 DÉFINITION D'UN PARC ÉOLIEN

Un parc éolien est une centrale produisant de l'électricité à partir de l'énergie éolienne, connectée au réseau électrique national. Il se compose dans ce cas d'une seule installation.

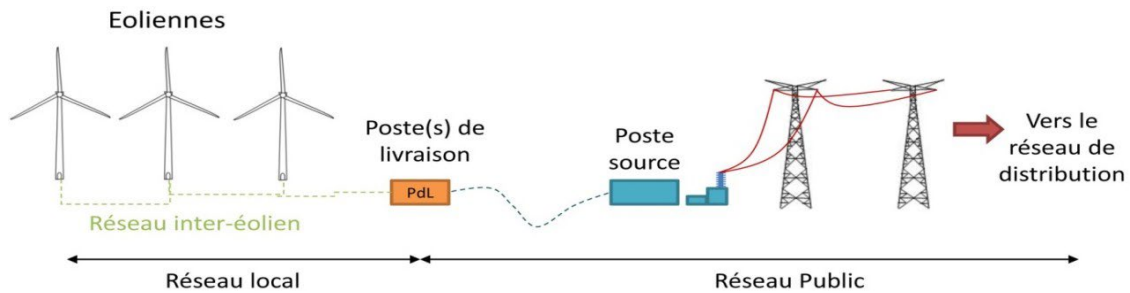


Figure 1 : Raccordement électrique des installations

(Source : Guide de l'étude de dangers des parcs éoliens, juin 2012)

Un parc éolien se compose de différents éléments :

- Une éolienne fixée sur une fondation appropriée, accompagnée d'une surface pendant la phase de construction, appelée "plateforme" ou "aire de grutage".
- Un réseau de câbles électriques souterrains qui transporte l'électricité produite par l'éolienne jusqu'au poste de livraison (appelé "réseau d'éoliennes").
- Un ou plusieurs postes de livraison électrique qui regroupent l'électricité produite par l'éolienne.
- Un réseau de câbles souterrains qui achemine l'électricité collectée dans le poste de livraison jusqu'au poste source local (point d'injection de l'électricité dans le réseau public).
- Une ou plusieurs voies d'accès.

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité, composé des éléments principaux suivants : **un mât** posé sur une fondation (qui peut être en béton, en fer ou une combinaison des deux), **une nacelle (salle des machines)** positionné(e) au sommet du mât (qui peut pivoter et tourner sur 360° afin de toujours positionner le rotor perpendiculairement au vent), le **rotor** sur lequel sont fixées les **pales** et, le cas échéant, un **transformateur**.

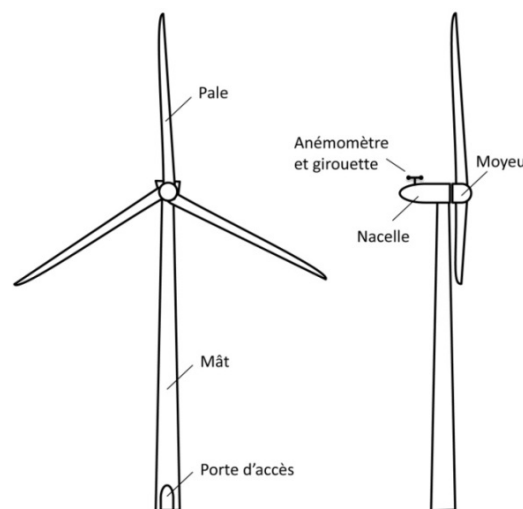


Figure 2 : Schéma simplifié d'une éolienne

(Source : Guide de l'étude de dangers des parcs éoliens, juin 2012)



La société « EMCA » a l'intention de construire une éolien d'une puissance totale comprise entre 6,0 et 6,8 MW (selon le type d'éolienne choisie).

Dans le cadre de ce projet, deux modèles d'éoliennes de taille à peu près équivalente sont envisagés par le promoteur, qui se réserve le droit de procéder ultérieurement au choix final :

**E175 (6,0 MW)**

**N175 Nordex (6,8 MW)**

## 2.2 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROJET "OEKOSTROUM HËLZEN"

### 2.2.1 ENVIRONNEMENT HUMAIN

L'éolien du projet « Oekostroum Hëlzen », composé d'une éolienne et d'un poste de livraison, est situé dans le canton de Wiltz dans la commune de Winseler, sur le territoire de la localité de Hëlzen. Les habitations les plus proches sont situées à plus de 2,0 km à vol d'oiseau de l'emplacement prévu pour l'éolienne.

Canton	Commune	Localité	Nombre d'habitants (situation en 2023)	Superficie	Hauteur
Clervaux	Wintger	Hëlzen	206	1,1 km <sup>2</sup>	+/- 485m

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des lieux

### 2.2.2 ENVIRONNEMENT NATUREL

La vitesse horaire moyenne du vent à Hëlzen connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année :

- La période la plus venteuse de l'année dure 5,8 mois, du 14 octobre au 7 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 16,6 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Hëlzen est janvier, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 19,7 kilomètres par heure.
- La période la plus calme de l'année dure 6,2 mois, du 7 avril au 14 octobre. Le mois le plus calme de l'année à Hëlzen est août, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 13,6 kilomètres par heure.

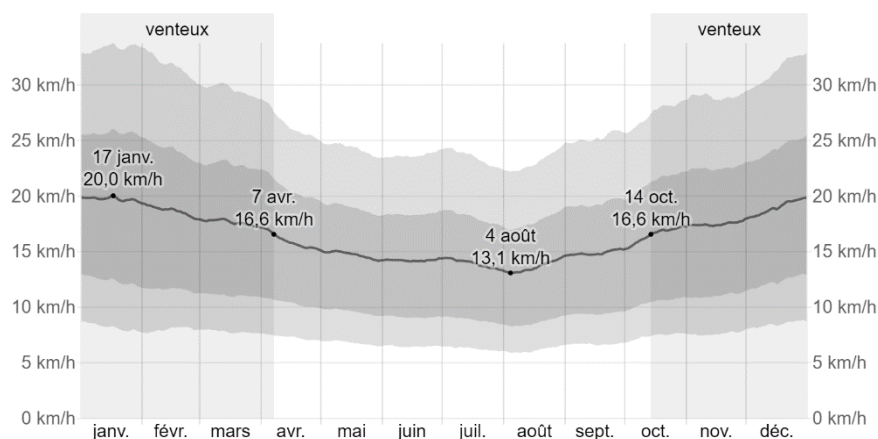
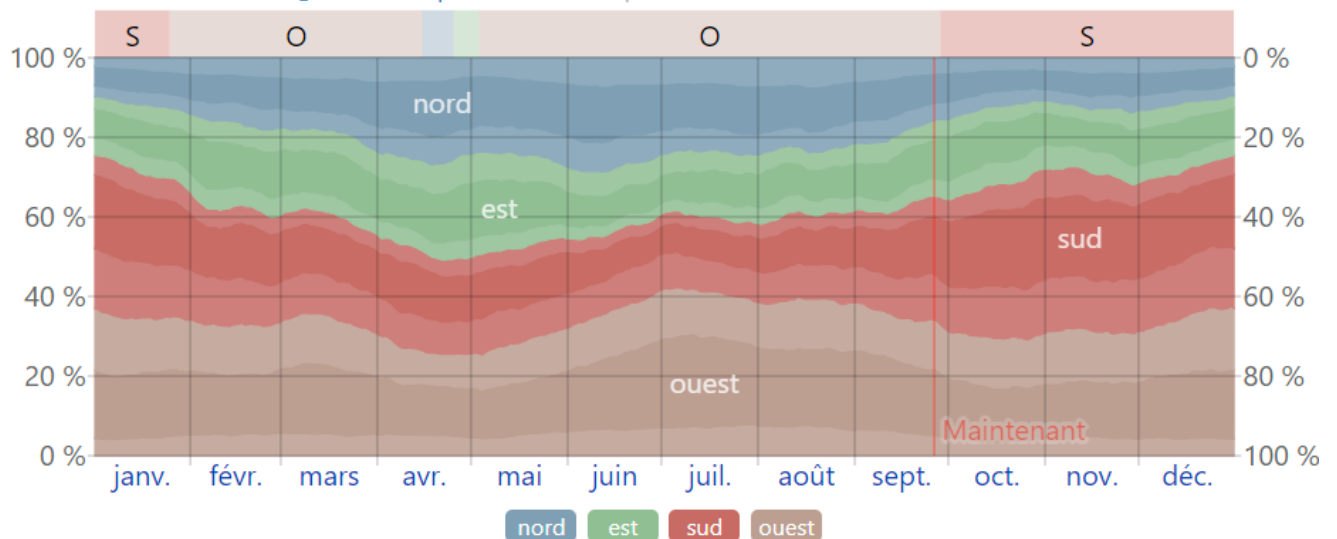


Figure 3 : Vitesse moyenne du vent à Hëlzen  
(Source : ©WeatherSpark.com)

La direction horaire moyenne principale du vent à Hëlzen varie au cours de l'année.

Le vent vient le plus souvent de l'ouest pendant 2,7 mois, du 25 janvier au 15 avril et pendant 4,8 mois, du 3 mai au 28 septembre, avec un pourcentage maximal de 42 % le 6 juillet. Le vent vient le plus souvent de l'est pendant 1,4 semaine, du 15 avril au 25 avril, avec un pourcentage maximal de 27 % le 18 avril. Le vent vient le plus souvent du sud pendant 3,9 mois, du 28 septembre au 25 janvier, avec un pourcentage maximal de 38 % le 1 janvier.



*Le pourcentage d'heures durant lesquelles la direction du vent moyen provient de chacun des quatre points cardinaux, excepté les heures au cours desquelles la vitesse du vent moyen est inférieure à 1,6 km/h. Les zones légèrement colorées au niveau des limites représentent le pourcentage d'heures passées dans les directions intermédiaires correspondantes (nord-est, sud-est, sud-ouest et nord-ouest).*

Figure 4 : Répartition de la direction du vent à Hëlzen  
(Source : ©WeatherSpark.com)

À Hëlzen, les étés sont confortables et partiellement nuageux et les hivers sont très froids, neige, venteux et couverts. Au cours de l'année, la température varie généralement de -1 °C à 21 °C et est rarement inférieure à -7 °C ou supérieure à 27 °C.

### 3. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES

Cette méthodologie répond aux exigences en utilisant la méthode recommandée dans le guide technique de l'étude de dangers dans le cadre d'un parc éolien (paru en juin 2012).

L'analyse des risques se déroule donc en trois étapes :

- Définition de la zone d'étude ;
- Analyse préliminaire des risques ;
- Analyse détaillée des risques.

L'ensemble de cette analyse permet d'identifier et de hiérarchiser les scénarios d'accidents majeurs selon plusieurs critères et de décrire les mesures de sécurité permettant de prévenir ces scénarios ou de limiter leur impact sur l'environnement.

### 3.1 DÉFINITION DU TERRITOIRE DE L'ÉTUDE

Le territoire de l'étude correspond à la zone sur laquelle les effets des différents scénarios d'accident sont possibles.

Cette zone est constituée de tous les points situés à une distance inférieure ou égale à 500 m du mât de l'éolienne. Cette distance correspond à la distance d'effet pour les phénomènes de projection.

### 3.2 ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES RISQUES

Cette première analyse identifie tous les scénarios d'accident potentiels pour une installation:

- Chute de glace ;
- Chute d'éléments de l'éolienne ;
- Effondrement de l'éolienne ;
- Projection de pales ou de fragments de pales ;
- Projection de glace ;
- Incendie de l'éolienne ;
- Incendie du poste de réception ;
- Pollution de l'environnement par infiltration d'huile dans le sous-sol.

Nom du scénario exclu	Justifications
<b>Incendie de l'éolienne (effets thermiques)</b>	Dans le cas d'un incendie de nacelle et en raison de la hauteur des nacelles, les effets thermiques ressentis au sol sont faibles. Par exemple, en cas d'incendie d'une nacelle à 50 m de hauteur, la valeur seuil de 3 kW/m <sup>2</sup> n'est pas atteinte. En cas d'incendie au niveau du mât, les effets sont également faibles. Ces effets ne sont donc pas examinés dans l'étude détaillée des risques. Il est toutefois à craindre que des chutes de pièces (ou des projections) se produisent en cas d'incendie. Ces effets sont étudiés en même temps que les chutes et les projections de pièces.
<b>Incendie du poste de livraison ou du transformateur</b>	En cas d'incendie de ces éléments, les effets à l'extérieur des bâtiments (poste de livraison) seront minimes, voire inexistantes, en raison de la structure en béton.
<b>Pollution de l'environnement par infiltration d'huile dans le sous-sol</b>	Si l'huile s'infiltre dans le sol, les quantités de substances libérées dans le sol restent faibles. Un bac de rétention sera installé, dont la capacité correspondra à 100% du volume total et qui sera protégé contre les infiltrations d'eau et les inondations. Ce scénario peut ne pas être détaillé dans le chapitre de l'étude détaillée des risques, à moins que le site ne soit situé dans un périmètre de protection rapprochée d'une nappe phréatique.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'analyse des risques

(Source : Guide de l'étude de dangers des parcs éoliens, juin 2012)

Les cinq catégories de scénarios examinées dans l'analyse détaillée des risques sont donc les suivantes :

- Chute de glace ;
- Chute d'éléments de l'éolienne ;
- Effondrement de l'éolienne ;
- Projection de pales ou de fragments de pales ;
- Projection de glace.

Pour chacun de ces scénarios, une étude a été menée sur les causes (événement déclencheur) et les séquences (événements intermédiaires) pouvant conduire à un accident.

### 3.3 ANALYSE DÉTAILLÉE DES RISQUES

#### 3.3.1 MÉTHODOLOGIE ET DÉFINITIONS

L'étude détaillée des risques sert à caractériser les scénarios issus de l'analyse préliminaire des risques en termes de probabilité, de cinétique, d'intensité et de gravité.

Elle permet ainsi de vérifier l'acceptabilité des risques potentiels générés par l'installation.

Cette première partie de l'étude détaillée des risques consiste donc à rappeler les définitions de chacun de ces paramètres en lien avec les références réglementaires correspondantes :

- Un **accident** est un événement indésirable, tel que le rejet d'une substance toxique, un incendie ou une explosion résultant d'une évolution incontrôlée pendant le fonctionnement d'une installation, qui entraîne des conséquences ou des dommages pour les personnes, les biens, l'environnement ou l'entreprise en général.
- La **cinétique** d'un accident est la vitesse d'enchaînement des événements qui constituent une séquence d'accidents, depuis l'événement déclencheur jusqu'aux conséquences pour les éléments vulnérables. Dans le cadre d'une étude de dangers pour les éoliennes, on suppose de manière conservatrice que tous les accidents considérés ont une cinétique rapide.
- Les **zones d'effets** sont définies pour chaque événement accidentel comme la surface exposée à cet événement.
- Le **degré d'exposition** est défini comme le rapport entre la surface atteinte par un élément qui tombe ou qui est projeté et la surface de la zone exposée à la chute ou à la projection.
- L'**intensité** des effets des phénomènes dangereux est définie par rapport à des valeurs de référence exprimées sous forme de seuils pour les effets toxiques, les effets de surpression, les effets thermiques et les effets liés à l'impact d'un projectile sur les personnes et les structures.

Intensité	Degré d'exposition
Exposition très élevée	Supérieur à 5 %
Forte exposition	Entre 1 % et 5 %
Exposition modérée	Moins de 1 %

Tableau 3 : Tableau récapitulatif de la classification de l'insécurité  
(Source : Guide de l'étude de dangers des parcs éoliens, juin 2012)

- La **détermination** du nombre de **personnes permanentes** :  
La zone d'étude se trouve au milieu de terres agricoles traversées par des chemins agricoles. Les deux routes les plus proches et les plus fréquentées sont la CR333 et le CR 337 qui se trouvent à plus de 2,0 km à vol d'oiseau de l'éolienne.
- Les **niveaux de gravité** sont déterminés en fonction du nombre équivalent de personnes permanentes dans chacun des domaines d'impact définis



Intensité Gravité	Zone d'effet d'un événement accidentel engendrant une exposition très forte	Zone d'effet d'un événement accidentel engendrant une exposition forte	Zone d'effet d'un événement accidentel engendrant une exposition modérée
« Désastreux »	Plus de 10 personnes exposées	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1000 personnes exposées
« Catastrophique »	Moins de 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées	Entre 100 et 1000 personnes exposées
« Important »	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées
« Sérieux »	Aucune personne exposée	Au plus 1 personne exposée	Moins de 10 personnes exposées
« Modéré »	Pas de zone de létalité en dehors de l'établissement	Pas de zone de létalité en dehors de l'établissement	Présence humaine exposée inférieure à « une personne »

- Les **classes de probabilité** qui doivent être utilisées dans les analyses des risques pour caractériser les scénarios d'accidents majeurs :

Niveaux	Échelle qualitative	Échelle quantitative (probabilité annuelle)
<b>A</b>	<i>Constamment</i> <i>Se produit sur le site considéré et/ou peut se produire de manière récurrente pendant la durée de vie des installations, malgré les mesures correctives possibles.</i>	$P > 10^{-2}$
<b>B</b>	<i>Probablement</i> <i>S'est produit pendant la durée de vie des dispositifs et/ou peut se produire pendant la durée de vie des dispositifs.</i>	$10^{-3} < P \leq 10^{-2}$
<b>C</b>	<i>Improbable</i> <i>Un événement similaire qui s'est déjà produit dans le secteur ou dans ce type d'organisation à l'échelle mondiale, sans que les éventuelles corrections apportées depuis lors ne garantissent une réduction significative de la probabilité.</i>	$10^{-4} < P \leq 10^{-3}$
<b>D</b>	<i>Rarement</i> <i>S'est déjà produit, mais des mesures correctives ont été prises pour réduire considérablement la probabilité.</i>	$10^{-5} < P \leq 10^{-4}$
<b>E</b>	<i>Extrêmement rare</i> <i>Possible, mais ne se produit pas dans le monde entier. N'est pas impossible en l'état actuel des connaissances.</i>	$\leq 10^{-5}$

Tableau 4 : Tableau récapitulatif de la classification des probabilités  
(Source : Guide de l'étude de dangers des parcs éoliens, juin 2012)

Dans le cadre de l'étude de dangers des parcs éoliens, la probabilité de chaque événement accidentel identifié pour une éolienne est déterminée en fonction :

- De documentations sur l'évaluation des risques des éoliennes ;
- A partir de feedbacks internationaux et d'autres informations internationales.

**Notez que la probabilité évaluée pour chaque scénario d'accident correspond à la probabilité qu'un événement redouté se produise sur l'éolienne (probabilité de démarrage) et non à la probabilité que cet événement provoque un accident suite à la présence d'un véhicule ou d'une personne au point d'impact (probabilité d'impact).**

### 3.3.2 LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ANALYSE DÉTAILLÉE DES RISQUES

L'acceptation de accidents potentiels pour chacun des cinq catégories de scénarios examinées prend en compte la probabilité et le degré de gravité respectivement le nombre de personnes permanentes dans la zone d'effet.

Dans le cas contraire, l'exploitant devra démontrer que des mesures de sécurité supplémentaires sont mises en place afin d'améliorer l'acceptabilité de ce risque.

Conséquence	Classe de Probabilité				
	E	D	C	B	A
Désastreux					
Catastrophique					
Important					
Sérieux					
Modéré					

Légende de la matrice

Niveau de risque	Couleur	Acceptabilité
Risque très faible		acceptable
Risque faible		acceptable
Risque important		non acceptable

Pour conclure à l'acceptabilité, la matrice de criticité ci-dessous sera utilisée. Dans le cadre de l'étude de dangers du projet « Oekostroum Hëlzen », deux types d'éoliennes sont soumis à une étude de risques détaillée.

Ci-dessous, un tableau récapitulatif des **caractéristiques de ces deux modèles** :

Type d'éoliennes à étudier	Hauteur mât + nacelle (H)	Hauteur du moyeu (H1)	Hauteur totale en bout de pale (H2)	Diamètre du rotor (D)	Longueur de la pale (R)	Largeur du mât (L)	Largeur de base de la pale (LB)
E175 de Enercon	164,75m	162m	249,5m	175m	85,98m	9,01m	3,3m
N175 de Nordex	181,5m	179m	266,5m	175m	87,5m	11,0m	3,3m

#### 3.3.2.1 CHUTE DE GLACE

##### Zone d'effets

Le risque de chute de glace est limité à la zone dans laquelle les pales survolent l'éolienne, c'est-à-dire un disque d'un rayon d'un demi-diamètre de rotor autour du mât de l'éolienne (D/2 mètres). Cependant, lorsque l'éolienne est à l'arrêt, les pales du rotor ne survolent qu'une petite partie de cette zone.

##### Intensité

Pour le phénomène de chute de glace, le degré d'exposition correspond au rapport entre la surface d'un morceau de glace et la surface de la zone d'effet du phénomène (zone de survol).

Le tableau suivant permet d'évaluer l'intensité du phénomène de chute de glace dans le cas du projet « Oekostroum Hëlzen ».

$Z_I$  = Zone d'impact |  $Z_E$  = Zone d'effet |  $R$  = la longueur de la pale |  $SG$  = surface d'un gros morceau de glace  
( $SG = 1 \text{ m}^2 \rightarrow$  dans le pire des cas) - consigne donnée par le Guide Etude technique.

Éoliennes	Zone d'impact en $\text{m}^2$	Zone d'effet du phénomène étudié, en $\text{m}^2$	Degré d'exposition du phénomène étudié, en %	Intensité
E175 de Enercon	$Z_I = SG$	$Z_E = \pi \times R^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	1	23.224	< 1% (0,004%)	Exposition modérée
N175 de Nordex	$Z_I = SG$	$Z_E = \pi \times R^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	1	24.053	< 1% (0,004%)	Exposition modérée

## Degré de gravité :

La classification du degré de gravité

- Plus de 1000 personnes exposées → "Désastreux".
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → "Catastrophique".
- Entre 10 et 100 personnes exposées → "Significatif".
- Moins de 10 personnes exposées → "Sérieux".
- Présence humaine exposée moins d'"une personne" → "Modéré".

Le tableau suivant indique, pour l'éolienne, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène de chute de glace et le degré de gravité qui y est associé

Éoliennes	Nombre de personnes permanentes (ou équivalents permanents)	Degré de gravité
Enercon / Nordex	<1	Modéré

Dans le périmètre délimité par la zone de survol de l'éolienne, le terrain est aménagé et peu fréquenté (1 personne pour 10 ha d'après la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010). Le nombre de personnes exposées sera donc inférieur à 1.

## Probabilité :

De manière conservatrice, on suppose que la probabilité correspond à la classe "A", c'est-à-dire une probabilité supérieure à  $10^{-2}$

## Acceptation

Pour une classe de probabilité de A, le risque de chute de glace pour chaque éolienne est jugé acceptable pour une gravité "modéré" si le nombre de personnes permanentes (ou équivalent) correspondant à cet événement est inférieur à 1.

Éoliennes	Degré de gravité	Niveau de risque
Enercon / Nordex	Modéré	Acceptable

Ainsi, pour le projet « Oekostroum Hëlzen », le phénomène de chute de glace des éoliennes représente un risque acceptable pour les personnes.

## 3.3.2.2 EFFONDREMENT DE L'ÉOLIENNE

### Zone d'effets

La zone d'effet de l'effondrement d'une éolienne correspond à une surface circulaire dont le rayon est égal à la hauteur totale de l'éolienne en bout de pale, soit 249,5m et 266,5 m pour les deux modèles d'éoliennes du projet « Oekostroum Hëlzen ».

### Intensité

Pour le phénomène d'effondrement d'une éolienne, le degré d'exposition correspond au rapport entre, d'une part, la surface totale du mât balayée par le rotor et la surface non balayée par le rotor et d'autre part, la surface de la zone d'effet du phénomène.

$Z_I$  = Zone d'impact |  $Z_E$  = Zone d'effet |  $R$  = longueur de la pale |  $H$  = hauteur du mât |  $L$  = largeur du mât

Éoliennes	Zone d'impact en m <sup>2</sup>	Zone d'effet du phénomène étudié, en m <sup>2</sup>	Degré d'exposition du phénomène étudié, en %	Intensité
E175 de Enercon	$Z_I = (H \times L) + 3 \cdot R \cdot LB/2$	$Z_E = \pi \times (H+R)^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	1.910	197.498	< 1% (0.97%)	Exposition modérée
N175 de Nordex	$Z_I = (H \times L) + 3 \cdot R \cdot LB/2$	$Z_E = \pi \times (H+R)^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	1.997	227.329	< 1% (0.88%)	Exposition modérée

## Degré de gravité

Cette intensité et les définitions du Guide Etude de dangers permettent de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène d'effondrement dans le rayon jusqu'à la hauteur totale de l'éolienne :

- Plus de 100 personnes exposées → "Désastreux".
- Entre 10 et 100 personnes exposées → "Catastrophique".
- Entre 1 et 10 personnes exposées → "Important".
- Pas plus d'une personne exposée → "Sérieux".
- Présence humaine exposée moins d'"une personne" → "Modéré".

Le tableau suivant indique, pour l'éolienne, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène d'effondrement de l'éolienne et le degré de gravité qui y est associé

Éolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalents permanents)	Degré de gravité
Enercon	2	Important
Nordex	3	Important

Dans le périmètre délimité par la zone d'effet du phénomène, le terrain est aménagé et peu fréquenté (1 personne pour 10 ha d'après la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010). Le nombre de personnes exposées sera donc à 2.

## Probabilité :

De manière conservatrice, on suppose que la probabilité est de classe "D", c'est-à-dire une probabilité de l'ordre de :  $10^{-5} < P \leq 10^{-4}$ .

## Acceptation

Dans le cas de l'installation d'éoliennes de technologie récente, compte tenu de la classe de probabilité d'un effondrement, on peut conclure que ce phénomène est acceptable si moins de 10 personnes sont en danger.

Éolienne	Degré de gravité	Niveau de risque
Enercon / Nordex	Important	Acceptable

Ainsi, pour le projet « Oekostroum Hëlzen », le phénomène d'effondrement de l'éolienne représente un risque acceptable pour les personnes.

### 3.3.2.3 CHUTE DE L'ÉLÉMENTS DE LA PALE DE L'ÉOLIENNE

#### Zone d'effets

Le risque de chute de pièces est limité à la zone de survol des pales, c'est-à-dire à une zone correspondant à un disque d'un rayon d'un demi-diamètre de rotor autour de la tour de l'éolienne (D/2 mètres).

#### Intensité

Pour le phénomène d'effondrement d'une éolienne, le degré d'exposition correspond au rapport entre, d'une part, la surface totale du mât balayée par le rotor et la surface non balayée par le rotor et, d'autre part, la surface de la zone d'effet du phénomène.

Pour le phénomène de chute d'éléments, le degré d'exposition correspond au rapport entre la surface d'un élément (dans le pire des cas, une pale entière qui se détache de l'éolienne) et la surface de la zone d'effet du phénomène (zone de survol).

**d** = degré d'exposition | **Z<sub>I</sub>** = zone d'impact | **Z<sub>E</sub>** = zone d'effet | **R** = longueur de la pale | **LB** = largeur de la base de la pale

Éoliennes	Zone d'impact en m <sup>2</sup> .	Zone d'effet du phénomène étudié, en m <sup>2</sup> .	Degré d'exposition du phénomène étudié, en %.	Intensité
E175 de Enercon	$Z_I = R^*(LB/2)$	$Z_E = \pi \times R^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	141,87	23.224	< 1% (0.61%)	Exposition modérée
N175 de Nordex	$Z_I = R^*(LB/2)$	$Z_E = \pi \times R^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	144,36	24.053	< 1% (0.60%)	Exposition modérée

## Degré de gravité

Cette intensité et les définitions du Guide Etude de dangers permettent de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de chute d'éléments de l'éolienne dans la zone de survol de l'éolienne :

- Plus de 100 personnes exposées → "Désastreux".
- Entre 10 et 100 personnes exposées → "Catastrophique".
- Entre 1 et 10 personnes exposées → "Important".
- Pas plus d'une personne exposée → "Sérieux".
- Présence humaine exposée moins d'une personne → "Modéré".

Le tableau suivant indique, pour l'éolienne, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet des chutes d'éléments et le degré de gravité qui y est associé

Éolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalents permanents)	Degré de gravité
Enercon / Nordex	<1	Sérieux

Dans le périmètre délimité par la zone d'effet du phénomène, le terrain est aménagé et peu fréquenté (1 personne pour 10 ha d'après la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010). Le nombre équivalent de personnes permanentes sera donc inférieur à 1.

## Probabilité

Pour ce type d'événement, on admet par défaut une probabilité de classe "C", c'est-à-dire une probabilité de l'ordre de :  $10^{-4} < P \leq 10^{-3}$

## Acceptation

Pour une classe de probabilité "C", le risque de chute de pièces est jugé acceptable pour chaque éolienne si moins de 10 personnes permanentes (ou équivalents) se trouvent dans la zone d'effet.

Éolienne	Degré de gravité	Niveau de risque
Enercon / Nordex	Sérieux	Acceptable

Ainsi, pour le projet « Oekostroum Hëlzen », le phénomène de chute d'éléments d'éoliennes représente un risque acceptable pour l'homme.

### 3.3.2.4 PROJECTIONS DE PALES OU DE FRAGMENTS DE PALES

#### Zone d'effets

Une distance d'effet de 500 mètres est considérée comme une distance raisonnable pour la prise en compte des pales ou des fragments de pales en mouvement dans le cadre des études de dangers des parcs éoliens.

#### Intensité

Pour le phénomène de projection de pales ou de fragments de pales, le degré d'exposition correspond au rapport entre la surface d'un élément (dans le pire des cas, une pale entière) et la surface de la zone d'effet du phénomène (500 m).

**d** = degré d'exposition | **Z<sub>I</sub>** = zone d'impact | **Z<sub>E</sub>** = zone d'effet | **R** = longueur de pale | **LB** = largeur de la base de la pale | **DE** = distance d'effet = 500m

Éoliennes	Zone d'impact en m <sup>2</sup> .	Zone d'effet du phénomène étudié, en m <sup>2</sup>	degré d'exposition du phénomène étudié, en %.	Intensité
E175 de Enercon	$Z_I = R^*(LB/2)$	$Z_E = \pi \times DE^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	141,87	785.398	< 1% (0.018%)	Exposition modérée
N175 de Nordex	$Z_I = R^*(LB/2)$	$Z_E = \pi \times DE^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	144,36	785.398	< 1% (0.018%)	Exposition modérée



## Degré de gravité

Cette intensité et les définitions du Guide Etude de dangers permettent de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de projection dans la zone de 500 m autour de l'éolienne :

- Plus de 1000 personnes exposées → "Désastreux".
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → "Catastrophique".
- Entre 10 et 100 personnes exposées → "Significatif".
- Pas plus de 10 personnes exposées → "Sérieux".
- Présence humaine exposée moins d'une personne → "Modéré".

Le tableau suivant indique, pour l'éolienne, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet des éléments éjectés et le degré de gravité qui y est associé

Éolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalents permanents)	Degré de gravité
Enercon / Nordex	8	Sérieux

Il est à noter que pour le projet « Oekostroum Hëlzen » », la zone d'effet est constituée de terrains aménagés et peu fréquentés (1 personne pour 10 ha d'après la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010). Le nombre équivalent de personnes permanentes sera donc inférieur à 10 (8 personnes).

## Probabilité

Pour ce type d'événement, on suppose une probabilité de classe "D", c'est-à-dire une probabilité de l'ordre de :  $10^{-5} < P \leq 10^{-4}$

## Acceptation

Avec une classe de probabilité de "D", le risque de projection d'une pale ou d'une partie de pale est jugé acceptable pour chaque type d'éolienne si un nombre équivalent de moins de 1000 personnes permanentes se trouve dans la zone d'impact.

Éolienne	Degré de gravité	Niveau de risque
Enercon / Nordex	Sérieux	Acceptable

Pour le projet « Oekostroum Hëlzen », le phénomène de projection d'une partie ou de la totalité d'une pale d'éolienne représente un risque acceptable pour les personnes.

## 3.3.2.5 PROJECTION DE GLACE

### Zone d'effets

La distance maximale atteinte par un tel jet correspond à une distance d'effet qui dépend de la hauteur et du diamètre de l'éolienne. Dans les cas où le nombre de jours de gel est élevé et où l'éolienne n'est pas équipée d'un système d'arrêt en cas de gel ou de givre :

$$\text{Distance d'effet} = 1,5 \times (\text{hauteur du moyeu} + \text{diamètre du rotor})$$

### Intensité

Pour le phénomène de projection de glace, le degré d'exposition correspond au rapport entre la surface d'un morceau de glace (taille maximale de 1 m<sup>2</sup>) et la surface de la zone d'effet du phénomène.

**d** = degré d'exposition | **Z<sub>I</sub>** = zone d'impact | **Z<sub>E</sub>** = zone d'effet | **R** = longueur de la pale | **H** = hauteur du moyeu  
**SG** = surface maximale d'un morceau de glace.

Éoliennes	Zone d'impact en m <sup>2</sup> .	Zone d'effet du phénomène étudié, en m <sup>2</sup> .	Degré d'exposition du phénomène étudié, en %.	Intensité
E175 de Enercon	$Z_I = SG$	$Z_E = \pi \times 1,5^2 (H+2R)^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	1	534.261	< 1% (0.0002%)	Exposition modérée
N175 de Nordex	$Z_I = SG$	$Z_E = \pi \times 1,5^2 (H+2R)^2$	$d = Z_I / Z_E$	
	1	598.908	< 1% (0.0002%)	Exposition modérée

## Degré de gravité

Cette intensité et les définitions du Guide Etude de dangers permettent de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de projection dans la zone d'effet :

- Plus de 1000 personnes exposées → " Désastreux".
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → "Catastrophique".
- Entre 10 et 100 personnes exposées → "Significatif".
- Pas plus de 10 personnes exposées → "Sérieux".
- Présence humaine exposée moins d'"une personne" → "Modéré".

Le tableau suivant indique, pour chaque éolienne, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène de projection de glace et le degré de gravité qui y est associé.

Éoliennes	Nombre de personnes permanentes (ou équivalents permanents)	Degré de gravité
Enercon / Nordex	6	Sérieux

Dans le périmètre délimité par la zone d'effet du phénomène, le terrain est aménagé et peu fréquenté (1 personne pour 10 ha d'après la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010). Le nombre équivalent de personnes permanentes sera donc inférieur à 10 (5 personnes).

## Probabilité

Une probabilité forfaitaire "B - événement probable" est proposée pour cet événement.

C'est-à-dire une probabilité de l'ordre de :  $10^{-3} < P \leq 10^{-1}$

## Acceptation

Le risque de projection pour chaque éolienne est jugé acceptable dans le cas de la gravité « Sérieux ». Cela correspond pour cet événement à un nombre équivalent de moins de 10 personnes permanentes dans la zone d'effet.

Éoliennes	Degré de gravité	Niveau de risque
Enercon / Nordex	Sérieux	Acceptable

Ainsi, pour le projet « Oekostroum Hëlzen », le phénomène de projection de glace représente un risque acceptable pour les personnes.

### 3.4 PRIORISATION DES SCÉNARIOS D'ACCIDENT EN FONCTION DE L'ÉVALUATION DE LEUR PROBABILITÉ D'OCCURRENCE, DE LA GRAVITÉ DE LEURS CONSÉQUENCES ET DE LEUR CINÉTIQUE D'ÉVOLUTION

#### 3.4.1 RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE DÉTAILLÉE DES RISQUES

Lors de la réalisation de l'étude de dangers, une analyse détaillée (calculs de la zone d'impact, de la zone d'effet, du niveau d'exposition, de l'intensité, de la gravité, du niveau de risque...) des accidents les plus significatifs en termes de risque a été effectuée pour chaque modèle d'éolienne étudié.

Le tableau suivant résume les paramètres de risque pour chaque événement sélectionné : Cinétique, intensité, gravité et probabilité.

Résumé de l'étude détaillée des risques – « Oekostroum Hëlzen »					
SECENARIES	ZONE D'EFFET	CINÉTIQUE	INTENSITÉ	PROBABILITÉ	GRAVITÉ
Effondrement de l'éolienne	Enercon: 249,5m	Rapide	Exposition forte	<b>D</b>	Important
	Nordex: 266,5m				
Chute d'éléments de l'éolienne	Enercon: 87,5m	Rapide	Exposition modérée	<b>C</b>	Sérieux
	Nordex: 87,5m				
Chute de glace	Enercon: 87,5m	Rapide	Exposition modérée	<b>A</b>	Modéré
	Nordex: 87,5m				
Projection de pales ou de fragments de pales	Enercon: 500m	Rapide	Exposition modérée	<b>D</b>	Sérieux
	Nordex: 500m				
Projection de glace	Enercon: 505m	Rapide	Exposition modérée	<b>B</b>	Sérieux
	Nordex: 531m				

#### 3.4.2 MATRICE DES RISQUES

Afin de pouvoir classer les scénarios d'accidents potentiels, l'étape suivante consiste à établir la matrice des risques afin d'évaluer l'acceptabilité des accidents potentiels pour chacun des phénomènes dangereux étudiés.

Type d'éolienne	Conséquence	Classe de probabilité				
		E	D	C	B	A
E175 / Enercon N175 / Nordex	Désastreux					
	Catastrophique					
	Important		Effondrement de l'éolienne			
	Sérieux		Projection des pales	Chute d'éléments de l'éolienne	Projection de glace	
	Modéré					Chute de glace

Niveau de risque	Couleur	Acceptation
Risque très faible		acceptable
Faible risque		acceptable
Risque élevé		Non acceptable

Il ressort clairement de ces résultats **qu'aucun accident ne se situe dans la zone rouge**, qui signifie un risque élevé inacceptable.

Pour le scénario "projection de pales", il est indiqué que le niveau de risque est très faible.

Certains accidents figurent dans la zone jaune et correspondent à un risque faible.

Pour ces accidents, il convient de noter que plusieurs mesures de sécurité sont prises afin d'améliorer sensiblement le risque (voir paragraphe suivant). La matrice des risques est valable pour les deux modèles d'éoliennes étudiés.

## 4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES MESURES D'AMÉLIORATION PERMETTANT DE RÉDUIRE LES RISQUES

### 4.1 DÉFINITIONS

Le tableau de la section suivante vise à résumer les fonctions de sécurité identifiées et mises en œuvre sur les éoliennes du projet « Oekostroum Hëlzen ».

Dans le cadre du présent résumé non technique, les fonctions de sécurité sont décrites en détail sur base des critères suivants :

- **Fonction de sécurité** : elle décrit l'objectif de la (ou des) mesure(s) de sécurité. Elle sera principalement : "prévenir, éviter, détecter, contrôler ou limiter" et sera liée à un ou plusieurs événements conduisant à un accident majeur identifié dans l'analyse des risques. Plusieurs mesures de sécurité peuvent remplir une seule et même fonction de sécurité.
- **Les mesures de sécurité** : cette ligne identifie les mesures qui assurent la fonction en question. Dans le cas de systèmes de sécurité instrumentés, tous les éléments de la chaîne de sécurité sont représentés (détection + traitement de l'information + action).
- **Description** : cette ligne permet de préciser la description de la mesure de contrôle des risques si des détails supplémentaires sont nécessaires.
- **L'efficacité** (100% ou 0%) : L'efficacité mesure la capacité d'une mesure de maîtrise des risques à remplir la fonction de sécurité qui lui est assignée sur une période donnée et dans son contexte d'utilisation.

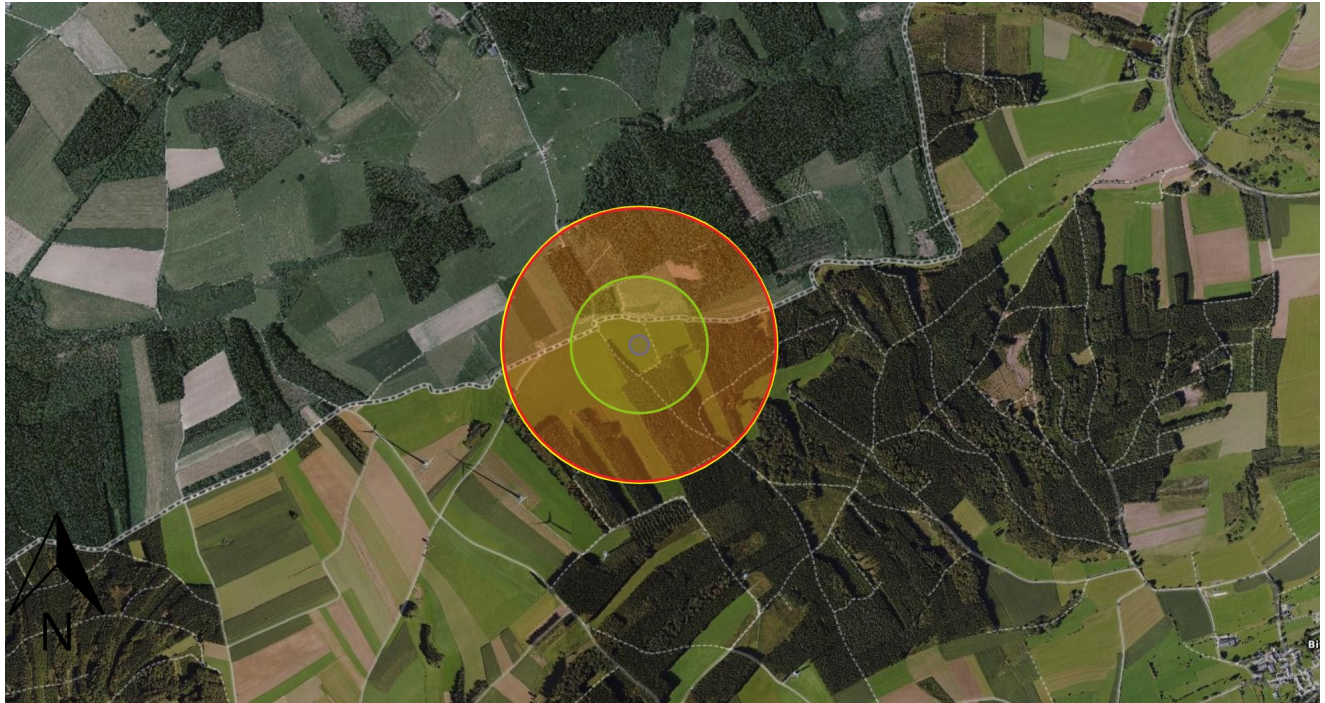
### 4.2 TABLEAUX RÉCAPITULATIFS DES MESURES DE PROTECTION

Mesures de sécurité	Fonction de sécurité	Description	Efficacité
Signalisation au pied de l'éolienne.	<b>Prévention des dommages corporels dus à la chute de glace.</b>	Mise en place de panneaux informant de la formation éventuelle de glace au pied ou au-dessus des routes d'accès à l'éolienne.	100%
Mise à la terre et protection de certaines parties de l'aérogénérateur.	<b>Prévenir les effets de la foudre.</b>	Respect de la norme ITM-SST 1106.2 ALL	100%
Contrôles réguliers des fondations et des différentes parties. Attestation de contrôle technique (procédure de permis de construire) Procédure de qualité.	<b>Prévenir les défauts de stabilité de l'éolienne et les erreurs de montage.</b>	La prescription ITM-SST 1840.2 " Eoliennes " définit les exigences pour assurer " un niveau de protection adéquat contre les dommages résultant de tout risque pendant la durée de vie " de l'éolienne. Les éoliennes sont protégées contre la corrosion due à l'humidité de l'air conformément à la norme ISO 9223.	100%
Système de détection ou de dérivation de la formation de glace sur les pales de l'aérogénérateur. Système de détection de la formation de glace sur la nacelle	<b>Empêcher l'éolienne de se mettre en mouvement en cas de formation de glace.</b>	Système redondant de détection de glace qui, en cas de détection de glace, permet d'arrêter rapidement l'aérogénérateur.	100%

Mesures de sécurité	Fonction de sécurité	Description	Efficacité
Procédure d'entretien.	Prévention des erreurs d'entretien.	Recommandations dans le manuel d'entretien et formation régulière du personnel.	100%

## 5. CARTOGRAPHIE D'ENSEMBLE

### ENERCON E175



Source: map.geoportail.lu

#### Légende :

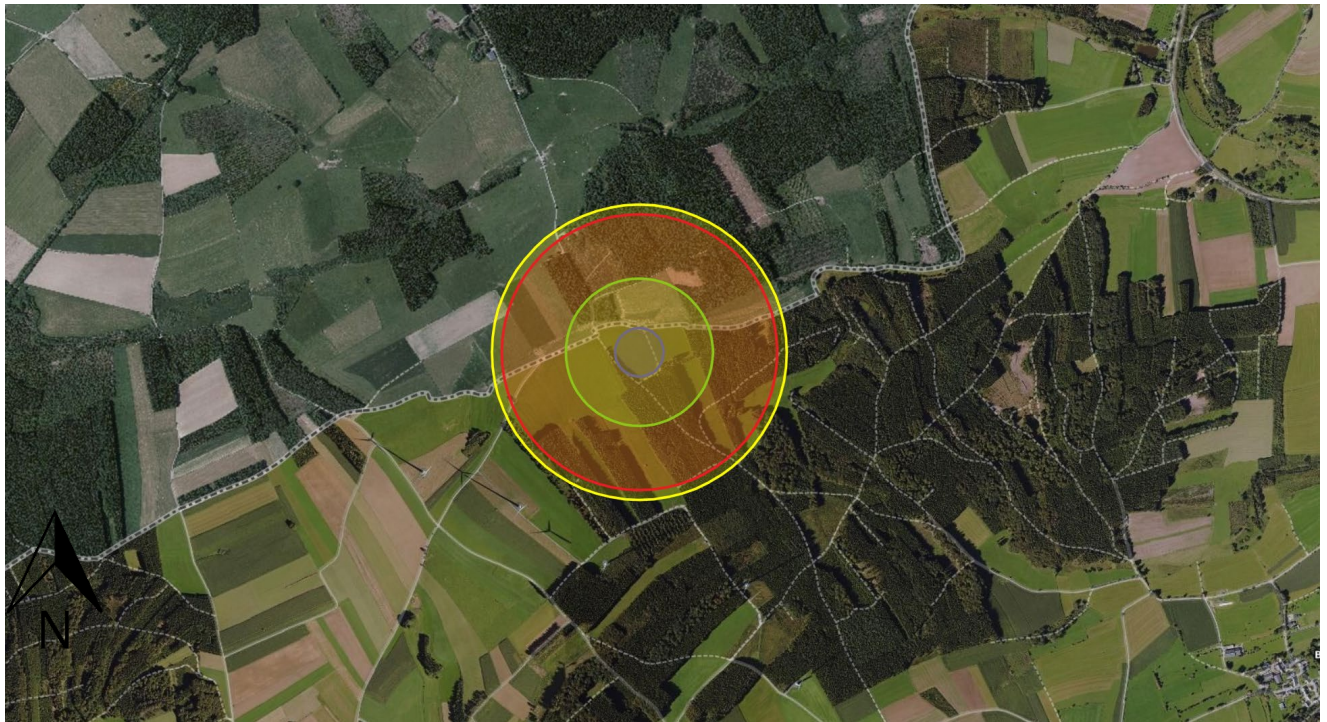
Chute d'éléments de l'éolienne	87,5m	Blue
Chute de glace	87,5m	Blue
Effondrement de l'éolienne	249,5m	Green
Projection de glace	505m	Yellow
Projection de pales ou de fragments de pales	500m	Red

Wind turbine coordinates	
LUREF	
X	64037.58
Y	132714.82
Elévation (LIDAR) : 485.45	

Land registry			
Parcel number	Municipality	Section	Locality
1522/2	Winchrage	HA de Hachiville	A Passadge



## Nordex N175



Source: map.geoportail.lu

### Légende :

Chute d'éléments de l'éolienne	87,5m	Blue
Chute de glace	87,5m	Blue
Effondrement de l'éolienne	266,5m	Green
Projection de glace	531m	Yellow
Projection de pales ou de fragments de pales	500m	Red

### Wind turbine coordinates

LUREF

X 64037.58

Y 132714.82

Élévation (LIDAR) : 485.45

### Land registry

Parcel number	Municipality	Section	Locality
1522/2	Wincrange	HA de Hachiville	A Passadge

## 6. CONCLUSION

L'étude de dangers a mis en évidence plusieurs accidents potentiels susceptibles de se produire pendant l'exploitation du parc éolien :

- l'effondrement de l'éolienne,
- la chute de glace,
- la chute d'éléments de l'éolienne
- la projection de glace,
- la projection de pales ou de fragments de pales.

Pour éviter ou limiter les conséquences d'un accident sur ce type d'installation, plusieurs mesures de maîtrise des risques sont mises en place (voir 4.2.).

Il convient de noter que pour le projet « Oekostroum Hëlzen », la zone d'impact est constituée de terrains non aménagés et peu fréquentés.

Ces zones peu fréquentées, couplées aux mesures de sécurité, permettent de limiter autant que possible les conséquences potentielles de ces accidents majeurs.

Les cartes de synthèse du chapitre 5 montrent que l'introduction de mesures de sécurité ne réduit pas les zones d'impact potentiel des accidents majeurs, mais réduit considérablement la probabilité que ces accidents se produisent.

Pour le projet « Oekostroum Hëlzen », les accidents majeurs identifiés représentent donc un risque acceptable pour les personnes exposées.

Cette analyse est valable pour les deux modèles d'éoliennes étudiés (E175 d'Enercon et N175 de Nordex).



**Florian ZEMANN**

Ingénieur Gérant – Associé  
CGC engineering S.à r.l.