

Eolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalent personnes permanentes)	Total (personnes permanentes)	Gravité
E1	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E2	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E3	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E4	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré

VIII.2.3.4 PROBABILITE

Peu d'éléments sont disponibles dans la littérature pour évaluer la fréquence des événements de chute d'éléments d'éoliennes.

A fin 2011, le retour d'expérience connu en France montre que ces événements ont une classe de probabilité « C ». En effet, 2 chutes et 5 incendies pour 15 667 années d'expérience, soit 4.47×10^{-4} événement par éolienne et par an.

A fin 2019, il a été recensé 5 chutes et 18 incendies pour des éoliennes de technologie récente (installation à partir de 2002 et puissance supérieure à 0,8 MW). Cela correspond à 23 incidents de ce type pour 60 000 années d'expérience, soit une probabilité de $3,8 \times 10^{-4}$ par éolienne soit un niveau équivalent à celui de 2011.

Ces événements correspondent également à la définition qualitative de l'arrêté du 29 Septembre 2005 d'une probabilité « C » : « *Événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité* ».

Une probabilité de classe « C » est donc retenue par défaut pour ce type d'événement.

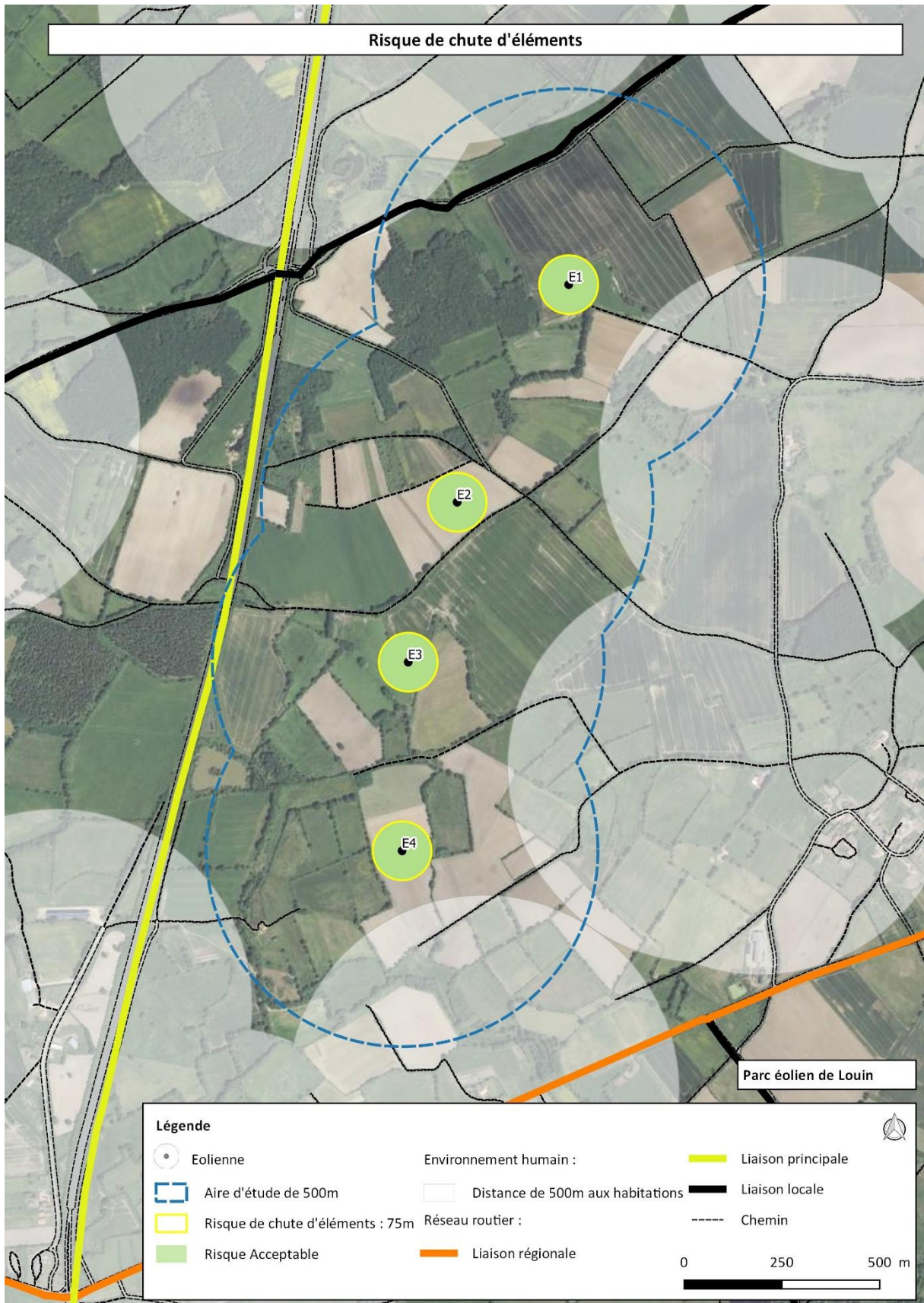
VIII.2.3.5 ACCEPTABILITE

Le tableau suivant rappelle, pour chaque aérogénérateur du parc de Louin, la gravité associée et le niveau de risque (acceptable/inacceptable) :

Tableau 40 : Acceptabilité du scénario « Chute d'élément »

Chute d'élément d'une éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : $D/2 = 75$ m)		
Eolienne	Gravité	Niveau de risque
E1	Modéré	Acceptable
E2	Modéré	Acceptable
E3	Modéré	Acceptable
E4	Modéré	Acceptable

Ainsi, pour le parc éolien de Louin, le phénomène de chute d'éléments de l'éolienne constitue un risque acceptable pour les personnes.



VIII.2.4 PROJECTION DE PALES OU DE FRAGMENTS DE PALES

VIII.2.4.1 ZONE D'EFFET

Dans l'accidentologie française rappelée en annexe, la distance maximale relevée et vérifiée par le groupe de travail précédemment mentionné pour une projection de fragment de pale est de 380 mètres par rapport au mât de l'éolienne. On constate que les autres données disponibles dans cette accidentologie montrent des distances d'effet inférieures.

L'accidentologie éolienne mondiale manque de fiabilité car la source la plus importante, en termes statistiques, est une base de données tenue par une association écossaise majoritairement opposée à l'énergie éolienne [3] (cf. Annexe 7).

Pour autant, des études de risques déjà réalisées dans le monde ont utilisé une distance de 500 mètres, en particulier les études [5] et [6] (cf. Annexe 7).

Sur la base de ces éléments et de façon conservatrice, **une distance d'effet de 500 mètres** est considérée comme distance raisonnable pour la prise en compte des projections de pales ou de fragments de pales dans le cadre des études de dangers des parcs éoliens.

VIII.2.4.2 INTENSITE

Pour le phénomène de projection de pale ou de fragment de pale, le degré d'exposition correspond au ratio entre la surface d'un élément (cas majorant d'une pale entière) et la superficie de la zone d'effet du phénomène (500 m).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de chute d'éléments de l'éolienne dans le cas du parc éolien de Louin avec :

- d = le degré d'exposition
- Z_I = la zone d'impact
- Z_E = la zone d'effet
- R = la longueur de pale (R = 75 m)
- LB = la largeur de la base de la pale (LB = 4,2 m).

Tableau 41 : Intensité du scénario « Projection de pale ou de fragments de pale »

Projection de pale ou de fragment de pale (zone de 500 m autour de chaque éolienne)			
Zone d'impact en m ²	Zone d'effet du phénomène étudié en m ²	Degré d'exposition du phénomène étudié en %	Intensité
$Z_I = R \cdot LB / 2$ La zone d'impact est de 158 m ²	$Z_E = \pi \times 500^2$ La zone d'effet est de 785 398 m ²	$d = Z_I / Z_E$ d = 0,02 % (< 1 %)	Exposition modérée

VIII.2.4.3 GRAVITE

En fonction de cette intensité et des définitions issues du paragraphe VIII.1.3., il est possible 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 → « Important »
- Moins de 10 personnes exposées → « Sérieux »
- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Modéré »

Le tableau suivant indique, pour chaque aérogénérateur, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène de projection et la gravité associée :

Tableau 42 : Gravité du scénario « Projection de pale ou de fragments de pale »

Projection de pale ou de fragments de pale (zone de 500 m autour de chaque éolienne)			
Eolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalent personnes permanentes)	Total (personnes permanentes)	Gravité
E1	0,79 (terrains non aménagés)	0,94	Modéré
	0,15 (terrains aménagés peu fréquentés)		
E2	0,79 (terrains non aménagés)	0,95	Modéré
	0,16 (terrains aménagés peu fréquentés)		
E3	0,79 (terrains non aménagés)	6,95	Sérieux
	0,10 (terrains aménagés peu fréquentés)		
	6,06 (voie de circulation automobile)		
E4	0,79 (terrains non aménagés)	0,86	Modéré
	0,07 (terrains aménagés peu fréquentés)		

VIII.2.4.4 PROBABILITE

Les valeurs retenues dans la littérature pour une rupture de tout ou partie de pale sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau 43 : Valeurs de la littérature pour la probabilité de rupture de tout ou partie de pale

Source	Fréquence	Justification
Évaluation des risques spécifiques à un site pour un projet de parc éolien [4]	1×10^{-6}	Respect de l'Eurocode EN 1990 – Basis of structural design
Guide de zonage des éoliennes basé sur les risques [5]	$1, 1 \times 10^{-3}$	Retour d'expérience au Danemark (1984-1992) et en Allemagne (1989-2001)
Spécification des distances minimales [6]	$6,1 \times 10^{-4}$	Recherche Internet des accidents entre 1996 et 2003

Ces valeurs correspondent à des classes de probabilité de « E », « C » ou « B ».

A fin 2011, le retour d'expérience français montre une classe de probabilité « C » (12 événements pour 15 667 années d'expérience, soit $7,66 \times 10^{-4}$ événement par éolienne et par an).

A fin 2019, il a été recensé 20 ruptures ou chutes de fragment ou de pale pour des éoliennes de technologie récente (installation à partir de 2002 et puissance supérieure à 0,8 MW). Cela correspond à 20 incidents pour 60 000 années d'expérience, soit une probabilité de $3,3 \times 10^{-4}$ par éolienne et un niveau deux fois plus faible que celui de 2011.

Ces événements correspondent également à la définition qualitative de l'arrêté du 29 Septembre 2005 d'une probabilité « C » : « *Événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité* ».

Une probabilité de classe « C » est donc retenue par défaut pour ce type d'événement.

Néanmoins, les dispositions constructives des éoliennes ayant fortement évolué, le niveau de fiabilité est aujourd'hui bien meilleur. Des mesures de maîtrise des risques supplémentaires ont été mises en place notamment :

- Les dispositions de la norme IEC 61 400-1
- Les dispositions des normes IEC 61 400-24 et EN 62 305-3 relatives à la foudre
- Système de détection des survitesses et un système redondant de freinage
- Système de détection des vents forts et un système redondant de freinage et de mise en sécurité des installations – un système adapté est installé en cas de risque cyclonique

- Utilisation de matériaux résistants pour la fabrication des pales (fibre de verre ou de carbone, résines, etc.)

De manière générale, le respect des prescriptions de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations éoliennes soumises à autorisation permet de s'assurer que les éoliennes font l'objet de mesures réduisant significativement la probabilité de projection.

Trois ruptures ou chutes de pale sont recensées au niveau national pour des éoliennes mises en service après 2011.

Il est considéré que la classe de probabilité de l'accident est « D » : « S'est produit mais a fait l'objet de mesures correctrices réduisant significativement la probabilité ».

VIII.2.4.5 ACCEPTABILITE

Le tableau suivant rappelle, pour chaque aérogénérateur du parc de Louin, la gravité associée et le niveau de risque (acceptable/inacceptable) :

Tableau 44 : Acceptabilité du scénario « Projection de pale ou de fragments de pale »

Projection de pale ou de fragment de pale (zone de 500 m autour de chaque éolienne)		
Eolienne	Gravité	Niveau de risque
E1	Modéré	Acceptable
E2	Modéré	Acceptable
E3	Sérieux	Acceptable
E4	Modéré	Acceptable

Ainsi, pour le parc éolien de Louin, le phénomène de projection de tout ou partie de pale des éoliennes constitue un risque acceptable pour les personnes.



VIII.2.5 PROJECTION DE GLACE

VIII.2.5.1 ZONE D'EFFET

L'accidentologie rapporte quelques cas de projection de glace. Ce phénomène est connu et possible, mais reste difficilement observable et n'a jamais occasionné de dommage sur les personnes ou les biens.

En ce qui concerne la distance maximale atteinte par ce type de projectiles, il n'existe pas d'information dans l'accidentologie. La référence [15] propose une distance d'effet fonction de la hauteur et du diamètre de l'éolienne, dans les cas où le nombre de jours de glace est important et où l'éolienne n'est pas équipée de système d'arrêt des éoliennes en cas de givre ou de glace :

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

Cette distance de projection est jugée conservatrice dans des études postérieures [17]. A défaut de données fiables et bien que les éoliennes du parc de Louin seront équipées de système d'arrêt en cas de givre ou de glace (cf. fonction de sécurité n°1), il est proposé de considérer cette formule pour le calcul de la distance d'effet pour les projections de glace, soit une **distance de 412,5 m pour les aérogénérateurs**.

VIII.2.5.2 INTENSITE

Pour le phénomène de projection de glace, le degré d'exposition correspond au ratio entre la surface d'un morceau de glace (cas majorant de 1 m²) et la superficie de la zone d'effet du phénomène.

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de projection de glace dans le cas du parc éolien de Louin, avec :

- d = le degré d'exposition
- Z_i = la zone d'impact
- Z_E = la zone d'effet
- R = la longueur de pale (R = 75 m)
- H_m = la hauteur au moyeu (H_m = 125 m)
- SG la surface majorante d'un morceau de glace.

Tableau 45 : Intensité du scénario « Projection de glace »

Projection de morceaux de glace (dans un rayon de 1,5 x (H _m +2R) autour de l'éolienne)			
Zone d'impact en m ²	Zone d'effet du phénomène étudié en m ²	Degré d'exposition du phénomène étudié en %	Intensité
Z _i = SG La zone d'impact est de 1 m ²	Z _E = π x (1,5*(H _m +2R)) ² La zone d'effet est de 534 562 m ²	d = Z _i /Z _E d = 0,0002 % (< 1 %)	Exposition modérée

VIII.2.5.3 GRAVITE

En fonction de cette intensité et des définitions issues du paragraphe VIII.1.3., il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de projection de glace, dans la zone d'effet de ce phénomène :

- Plus de 1000 personnes exposées → « Désastreux »
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Catastrophique »
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Important »
- Moins de 10 personnes exposées → « Sérieux »
- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Modéré »

Il a été observé dans la littérature disponible [17] qu'en cas de projection, les morceaux de glace se cassent en petits fragments dès qu'ils se détachent de la pale. La possibilité de l'impact de glace sur des personnes abritées par un bâtiment ou un véhicule est donc négligeable et ces personnes ne doivent pas être comptabilisées pour le calcul de la gravité.