

8. Analyse détaillée des risques

L'étude détaillée des risques vise à caractériser les risques (des scénarios retenus précédemment) liés à la mise en service du parc éolien de Fère-Champenoise (en termes de probabilité, cinétique, intensité et gravité) et d'évaluer les mesures de maîtrise et de réduction de ces risques. L'analyse détaillée permet donc de vérifier l'acceptabilité des risques potentiels générés par l'installation.

8.1. Rappel des définitions

8.1.1. Cinétique

La cinétique d'un accident est la vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur jusqu'aux conséquences sur des éléments vulnérables.

Selon l'article 8 de l'arrêté du 29 septembre 2005, la cinétique peut être qualifiée de « lente » ou de « rapide ». Dans le cas d'une cinétique lente, les personnes ont le temps d'être mises à l'abri à la suite de l'intervention des services de secours. Dans le cas contraire, la cinétique est considérée comme rapide.

Dans le cadre d'une étude de dangers pour des aérogénérateurs, il est supposé, de manière prudente, que tous les accidents considérés ont une **cinétique rapide**. Ce paramètre ne sera donc pas détaillé à nouveau dans chacun des phénomènes redoutés étudiés par la suite.

8.1.2. Intensité

L'intensité des effets des phénomènes dangereux est définie par rapport à des valeurs de référence exprimées sous forme de seuils. Les seuils proposés par l'arrêté du 29 septembre 2005 ne sont pas adaptés aux accidents générés par l'utilisation d'aérogénérateurs (chute d'éléments, projection de glace ou de pale, effondrement de la machine etc.). C'est pourquoi, pour chaque événement accidentel potentiel retenu, des degrés d'exposition ont été calculés :

Tableau 39 : Intensité et degré d'exposition

| Intensité | Degré d'exposition |
|-----------------------|--------------------------|
| Exposition très forte | Supérieur à 5 % |
| Exposition forte | Compris entre 1 % et 5 % |
| Exposition modérée | Inférieur à 1 % |

NB : Le degré d'exposition est défini comme le rapport entre la surface atteinte par un élément chutant ou projeté et la surface de la zone exposée à la chute ou à la projection.

8.1.3. Gravité

Les seuils de gravité sont déterminés en fonction du nombre équivalent de personnes permanentes dans chacune des zones d'effet définies dans le paragraphe précédent (Annexe III de l'arrêté du 29 septembre 2005).

Tableau 40 : Détermination de la gravité d'un risque

| Gravité | Intensité | 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 » |

8.1.4. Probabilité

L'annexe I de l'arrêté du 29 septembre 2005 définit les classes de probabilité qui doivent être utilisée dans les études de dangers pour caractériser les scénarios d'accident majeur :

Tableau 41 : Classes de probabilité utilisée pour caractériser les risques

| Niveaux | Echelle qualitative | Echelle quantitative (probabilité annuelle) |
|--------------------------------|--|--|
| <i>Courant</i> | | |
| A | Se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives. | $P > 10^{-2}$ |
| <i>Probable</i> | | |
| B | S'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations. | $10^{-3} < P \leq 10^{-2}$ |
| <i>Improbable</i> | | |
| 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. | $10^{-4} < P \leq 10^{-3}$ |
| <i>Rare</i> | | |
| D | S'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité. | $10^{-5} < P \leq 10^{-4}$ |
| <i>Extrêmement rare</i> | | |
| E | Possible mais non rencontré au niveau mondial. N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles. | $\leq 10^{-5}$ |

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 la bibliographie relative à l'évaluation des risques pour des éoliennes ;
- du retour d'expérience français ;
- des définitions qualitatives de [l'arrêté du 29 Septembre 2005](#).

Par ailleurs, conformément à [l'arrêté du 29 septembre 2005](#), la probabilité qui sera évaluée pour chaque scénario d'accident correspond à la **probabilité qu'un événement redouté se produise sur l'éolienne (probabilité de départ)** et non à la probabilité que cet événement produise un accident suite à la présence d'un véhicule ou d'une personne au point d'impact (probabilité d'atteinte).

La méthode de comptage des personnes, établie par les réglementations en vigueur, pour la détermination de la gravité potentielle d'un accident à proximité d'une éolienne est présentée en annexe 2 de cette même étude de danger.

8.2. Caractérisation des scénarios retenus

8.2.1. Effondrement de l'éolienne

8.2.1.1. Zone d'effet

La zone d'effet de l'effondrement d'une éolienne correspond à la **surface circulaire de rayon égal à la hauteur hors tout totale H de l'éolienne en bout de pale**, soit 150 mètres dans le cas des éoliennes V117-3,3.

La zone d'effet pour une éolienne du projet est donc :

$$ZE = \pi \times H^2$$

$$ZE = \pi \times 150^2 = 70\,686 \text{ m}^2$$

Les risques d'atteinte d'une personne ou d'un bien en dehors de cette zone d'effet sont négligeables et n'ont jamais été relevés dans l'accidentologie ou la littérature spécialisée.

Dans le cas du scénario d'effondrement de l'éolienne, les zones d'effet sont exclusivement composées de champs agricoles et de chemins agricoles (voir carte suivante). La [circulaire du 10 mai 2010](#) relative aux règles méthodologiques applicables aux études de dangers, indique que les champs agricoles correspondent à des terrains non aménagés et très peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 100 hectares) et que les chemins agricoles correspondent à des terrains aménagés mais peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 10 hectares).

Dans le cadre du projet éolien de Fère-Champenoise on comptabilise donc aux niveaux des différentes zones d'effet pour le scénario d'effondrement de l'éolienne¹⁵ :

Tableau 42 : Nombre de personnes permanentes exposées dans le cadre du scénario de l'effondrement de l'éolienne

| ZE des éoliennes | Champs agricoles | | Chemins agricoles | | Total des personnes permanentes exposées dans la zone d'effet |
|------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | |
| F1 | 7,07 | 0,07 | 0 | 0 | 0,07 |
| F2 | 7,07 | 0,07 | 0 | 0 | 0,07 |
| F3 | 7,07 | 0,07 | 0,05 | 0,005 | 0,07 |
| F4 | 7,07 | 0,07 | 0 | 0 | 0,07 |

¹⁵ Les calculs sont réalisés de manière conservatrice en arrondissant toujours les unités vers le haut



8.2.1.2. Intensité

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

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène d'effondrement de l'éolienne dans le cas du parc éolien prévu.

Tableau 43 : Intensité de l'effondrement d'une l'éolienne

| Hauteur de moyeu | Zone d'impact en m ² | Zone d'effet du phénomène étudié en m ² | Degré d'exposition du phénomène en % | Intensité |
|------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------|
| H | $ZI = H \times L + 3 \times R \times LB/2$ | $ZE = \pi \times H^2$ | $d = ZI/ZE$ | |
| 91,5 | 690 | 70 686 | 0,98 % | Exposition modérée |

R correspond à la longueur de pale (57 mètres pour la V117-3,3),

H correspond à la hauteur totale en bout de pale (150 mètres pour la V117-3,3),

LB correspond à la largeur maximale de la pale (4 mètres pour la V117-3,3)

L correspond à la largeur moyenne du mât (3,8 mètre pour la V117-3,3).

L'intensité du phénomène d'effondrement est nulle au-delà de la zone d'effondrement.

8.2.1.3. Gravité

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre, il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène d'effondrement, dans le rayon inférieur ou égal à la hauteur totale de l'éolienne :

Si le phénomène de chute d'élément engendre une zone d'exposition modérée :

- Plus de 1 000 personnes exposées → « gravité désastreuse » ;
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « gravité catastrophiques » ;
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « gravité importante » ;
- Moins de 10 personnes exposées → « gravité sérieuse » ;
- Présence humaine exposée inférieure à 1 personne → « gravité modérée ».

Pour la plupart des parcs éoliens (et comme pour celui-ci), dans le périmètre délimité par la hauteur de chute de l'éolienne, les terrains sont non aménagés et très peu fréquentés.

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

Tableau 44 : Gravité de l'effondrement des éoliennes du projet

| Eolienne | Nombre de personnes permanentes exposées | Gravité |
|----------|--|---------|
| F1 | = OU < 1 | Modérée |
| F2 | = OU < 1 | Modérée |
| F3 | = OU < 1 | Modérée |
| F4 | = OU < 1 | Modérée |

8.2.1.4. Probabilité

Pour l'effondrement d'une éolienne, les valeurs retenues dans la littérature sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau 45 : Probabilité d'effondrement d'une éolienne selon la littérature

| Source | Fréquence | Justification |
|--|--|---------------------|
| Guide for risk based zoning of wind turbines [5] | $4,5 \times 10^{-4}$ | Retour d'expérience |
| Specification of minimum distances [6] | $1,8 \times 10^{-4}$ (effondrement de la nacelle et de la tour) | Retour d'expérience |

Ces valeurs correspondent à une classe de probabilité « C » (selon l'arrêté du 29 septembre 2005).

Le retour d'expérience français montre également une classe de probabilité « C ». En effet, il a été recensé seulement 7 événements pour 15 667 années d'expérience¹⁶, soit une probabilité de $4,47 \times 10^{-4}$ par éolienne et par an.

Ces événements correspondent également à la définition qualitative de l'arrêté d'une probabilité « C », à savoir : « *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* ».

¹⁶ Une année d'expérience correspond à une éolienne observée pendant une année. Ainsi, si on a observé une éolienne pendant 5 ans et une autre pendant 7 ans, on aura au total 12 années d'expérience.

Une probabilité de classe « C » est donc retenue par défaut et dans un premier temps pour ce type d'événement.

Néanmoins, les dispositions constructives des éoliennes ayant fortement évoluées, le niveau de fiabilité est aujourd'hui bien meilleur. Des mesures de maîtrise des risques supplémentaires ont été mises en place sur les machines récentes et permettent de réduire significativement la probabilité d'effondrement.

Ces mesures de sécurité sont notamment :

- respect intégral des dispositions de la norme IEC 61 400-1
- contrôles réguliers des fondations et des différentes pièces d'assemblages
- 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

On note d'ailleurs, dans le retour d'expérience français, qu'aucun effondrement n'a eu lieu sur les éoliennes mises en service après 2005.

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 d'effondrement.

Par conséquent il est considéré que la classe de probabilité de l'accident est « D », à savoir : « S'est produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité ».

8.2.1.5. Acceptabilité

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

Tableau 46 : Niveau d'acceptabilité des risques en cas d'effondrement de l'éolienne

| Eolienne | Gravité | Niveau de risque |
|----------|---------|------------------|
| F1 | Modérée | Acceptable |
| F2 | Modérée | Acceptable |
| F3 | Modérée | Acceptable |
| F4 | Modérée | Acceptable |

Ainsi, pour le parc éolien de Fère-Champenoise, le phénomène d'effondrement des éoliennes constitue un risque acceptable pour les personnes.

8.2.2. Chute de glace

8.2.2.1. Considérations générales

Les périodes de gel peuvent entraîner, dans des conditions de température et d'humidité de l'air bien particulières, une formation de givre ou de glace sur l'éolienne, d'où un risque potentiel de chute de glace.

Une grande partie du territoire français (en dehors des zones en montagne) est concerné par moins d'un jour de formation de glace par an. Certains secteurs du territoire comme les zones côtières affichent des moyennes variant entre 2 et 7 jours de formation de glace par an.

Lors des périodes de dégel qui suivent les périodes de grand froid, des chutes de glace peuvent se produire depuis la structure de l'éolienne (nacelle, pales). Normalement, le givre qui se forme en fine pellicule sur les pales de l'éolienne fond avec le soleil, mais en cas de vents forts, des morceaux de glace peuvent se détacher. Ils se désagrègent généralement avant d'arriver au sol. Ce type de chute de glace est similaire à ce qu'on observe sur d'autres bâtiments et infrastructures.

8.2.2.2. Zone d'effet

Le risque de chute de glace est cantonné à la **zone de survol des pales**, soit un disque de rayon égal à un demi-diamètre de rotor (soit dans le cas de la V117-3,3 à 58,5 mètres) autour du mât de l'éolienne.

Pour le parc éolien de Fère-Champenoise, la zone d'effet est donc :

$$ZE = \pi \times \frac{D^2}{4}$$

$$ZE = \pi \times \frac{117^2}{4} = 10\,751 \text{ m}^2$$

Cependant il est important de noter que, lorsque l'éolienne est à l'arrêt, les pales n'occupent qu'une faible partie de cette zone.



Dans le cas du scénario de chute de glace, les zones d'effet sont exclusivement composées de champs agricoles et de chemins agricoles (voir ci-dessus). La [circulaire du 10 mai 2010](#) relative aux règles méthodologiques applicables aux études de dangers indique que les champs agricoles correspondent à des terrains non aménagés et très peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 100 hectares) et que les chemins agricoles correspondent à des terrains aménagés mais peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 10 hectares).

Dans le cadre du projet éolien de Fère-Champenoise on comptabilise donc aux niveaux des différentes zones d'effet pour le scénario de chute de glace :

Tableau 47 : Nombre de personnes permanentes exposées dans le cadre du scénario de chute de glace

| ZE des éoliennes | Champs agricoles | | Chemins agricoles | | Total des personnes permanentes exposées dans la zone d'effet |
|------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | |
| F1 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |
| F2 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |
| F3 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |
| F4 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |

8.2.2.3. Intensité

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

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de chute de glace, sachant que ZI est la zone d'impact, ZE est la zone d'effet, R est la longueur de pale, SG est la surface du morceau de glace majorant ($SG = 1 \text{ m}^2$).

Tableau 48 : Intensité du risque de chute de glace

| Zone d'impact en m^2 | Zone d'effet du phénomène étudié en m^2 | Degré d'exposition du phénomène étudié en % | Intensité |
|-------------------------------|--|---|-----------|
| $ZI = SG$ | $ZE = \pi * D^2/4$ | $d = ZI/ZE$ | |
| 1 | 10 751 | 0,009 % | Modérée |

Par ailleurs, l'intensité est nulle hors de la zone de survol.

8.2.2.4. Gravité

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre 2005, il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de chute de glace, dans la zone de survol de l'éolienne :

- Plus de 1000 personnes exposées → « Gravité désastreuse » ;
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Gravité catastrophiques » ;
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Gravité importante » ;
- Moins de 10 personnes exposées → « Gravité sérieuse » ;
- Présence humaine exposée inférieure à 1 personne → « Gravité modérée ».

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

Tableau 49 : Gravité en cas de chute de glace

| Eolienne | Nombre de personnes permanentes exposées | Gravité |
|----------|--|---------|
| F1 | = ou < 1 | Modérée |
| F2 | = ou < 1 | Modérée |
| F3 | = ou < 1 | Modérée |
| F4 | = ou < 1 | Modérée |

8.2.2.5. Probabilité

De façon conservatrice et pour plus de sécurité, il est considéré que la probabilité est de classe « A », c'est-à-dire une probabilité supérieure à 10^{-2} .

8.2.2.6. Acceptabilité

Avec une classe de probabilité A, le risque de chute de glace pour chaque éolienne est évalué comme acceptable dans le cas d'une gravité « modérée » (ce qui correspond pour cet événement à un nombre de personnes permanentes inférieur ou équivalent à 1).

Tableau 50 : Niveau d'acceptabilité des risques en cas de chute de glace

| Eolienne | Gravité | Niveau de risque |
|----------|---------|------------------|
| F1 | Modérée | Acceptable |
| F2 | Modérée | Acceptable |
| F3 | Modérée | Acceptable |
| F4 | Modérée | Acceptable |

Ainsi, pour le parc éolien de Fère-Champenoise, le phénomène de chute de glace depuis les éoliennes constitue un risque acceptable pour les personnes.

Par ailleurs, conformément à l'article 14 de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations éoliennes soumises à autorisation, un panneau informant le public des risques (et notamment des risques de chute de glace) sera installé sur le chemin d'accès de chaque aérogénérateur, c'est-à-dire en amont de la zone d'effet de ce phénomène. Cette mesure permettra de réduire les risques pour les personnes potentiellement présentes sur le site lors des épisodes de grand froid.

8.2.3. Chute d'éléments de l'éolienne

8.2.3.1. Zone d'effet

La chute d'éléments comprend la chute de tous les équipements situés en hauteur : trappes, boulons, morceaux de pales ou pales entières. Le cas majorant est ici le cas de la chute de pale. Il est retenu dans l'étude détaillée des risques pour représenter toutes les chutes d'éléments.

Le risque de chute d'élément est cantonné à la **zone de survol des pales**, c'est-à-dire une zone d'effet de 10 751 m².

Dans le cas du scénario de chute d'éléments de l'éolienne, les zones d'effet sont exclusivement composées de champs agricoles et de chemins agricoles (voir carte suivante). La circulaire du 10 mai 2010 relative aux règles méthodologiques applicables aux études de dangers indique que les champs agricoles correspondent à des terrains non aménagés et très peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 100 hectares) et que les chemins agricoles correspondent à des terrains aménagés mais peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 10 hectares). Dans le cadre du projet éolien de Fère-Champenoise on comptabilise donc aux niveaux des différentes zones d'effet pour le scénario de chute d'éléments de l'éolienne :

Tableau 51 : Nombre de personnes permanentes exposées dans le cadre du scénario de chute d'éléments de l'éolienne

| ZE des éoliennes | Champs agricoles | | Chemins agricoles | | Total des personnes permanentes exposées dans la zone d'effet |
|------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | |
| F1 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |
| F2 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |
| F3 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |
| F4 | 1,07 | 0,011 | 0 | 0 | 0,011 |



8.2.3.2. Intensité

Pour le phénomène de chute d'éléments, le degré d'exposition correspond au ratio entre la surface d'un élément (cas majorant d'une pale entière se détachant de l'éolienne) et la superficie de la zone d'effet du phénomène (zone de survol).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de chute d'éléments de l'éolienne dans le cas du projet planifié, sachant que d est le degré d'exposition, ZI la zone d'impact, ZE la zone d'effet, R la longueur de pale et LB la largeur maximale de la pale et D est le diamètre du rotor.

Tableau 52 : Intensité de la chute d'éléments des éoliennes

| Zone d'impact en m ² | Zone d'effet du phénomène étudié en m ² | Degré d'exposition du phénomène en % | Intensité |
|---------------------------------|--|--------------------------------------|------------------|
| $ZI = R * LB / 2$ | $ZE = \pi * D^2 / 4$ | $d = ZI / ZE$ | |
| 114 | 10 751 | 1 % | Exposition forte |

Par ailleurs, l'intensité en dehors de la zone de survol est nulle.

8.2.3.3. Gravité

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre 2005, il est possible 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 → « Gravité désastreuse » ;
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Gravité catastrophique » ;
- Entre 1 et 10 personnes exposées → « Gravité importante » ;
- Au plus 1 personne exposée → « Gravité sérieuse » ;
- Pas de zone de létalité en dehors de l'établissement → « Gravité modérée ».

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

Tableau 53 : Gravité en cas de chute d'éléments des éoliennes

| Eolienne | Nombre de personnes permanentes exposées | Gravité |
|----------|--|----------|
| F1 | Au plus 1 personne exposée | Sérieuse |
| F2 | Au plus 1 personne exposée | Sérieuse |
| F3 | Au plus 1 personne exposée | Sérieuse |
| F4 | Au plus 1 personne exposée | Sérieuse |

8.2.3.4. Probabilité

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

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

Ces événements correspondent également à la définition de l'arrêté du < 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 pour ce type d'événement.

8.2.3.5. Acceptabilité

Avec une classe de probabilité C, le risque de chute d'éléments pour chaque éolienne est évalué comme acceptable dans le cas d'un nombre de personnes permanentes inférieur ou équivalent à 10 dans la zone d'effet.

Tableau 54 : Niveau d'acceptabilité des risques en cas de chute d'éléments des éoliennes

| Eolienne | Gravité | Niveau de risque |
|----------|----------|------------------|
| F1 | Sérieuse | Acceptable |
| F2 | Sérieuse | Acceptable |
| F3 | Sérieuse | Acceptable |
| F4 | Sérieuse | Acceptable |

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

8.2.4. Projection de pales ou de fragments de pales

8.2.4.1. Zone d'effet

Dans l'accidentologie française, la distance maximale relevée pour une projection de fragment de pales 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. Cependant, des études de risques déjà réalisées dans le monde ont utilisés une distance de 500 mètres.

Sur la base de ces éléments et de façon conservatrice, **une Distance d'Effet (DE) de 500 mètres** est considérée comme une 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.

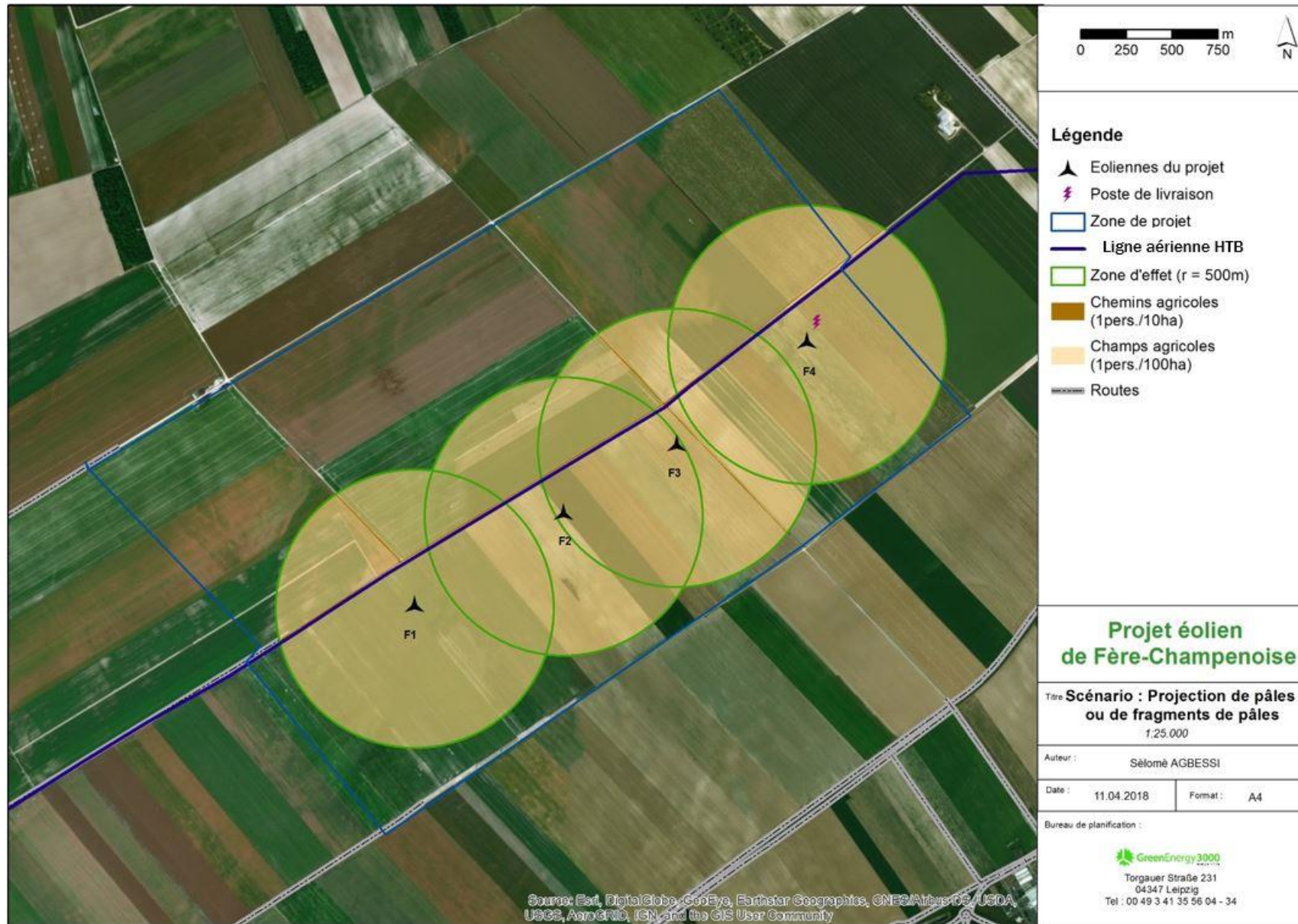
La zone d'effet de projection de pales ou de fragments de pales est donc :

$$ZE = \pi \times DE^2$$

$$ZE = \pi \times 500^2 = 785\,398 \text{ m}^2$$

Dans le cas du scénario de projection de paâles ou de fragments de pales, les zones d'effet sont principalement composées de champs agricoles et de chemins agricoles (voir carte suivante).

La [circulaire du 10 mai 2010](#) relative aux règles méthodologiques applicables aux études de dangers indique que les champs agricoles correspondent à des terrains non aménagés et très peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 100 hectares) et que les chemins agricoles correspondent à des terrains aménagés mais peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 10 hectares).



Dans le cadre du projet éolien de Fère-Champenoise on comptabilise donc aux niveaux des différentes zones d'effet pour le scénario de projection de pales ou de fragments de pales :

Tableau 55 : Nombre de personnes permanentes exposées dans le cadre du scénario de projection de pales ou de fragments de pales

| ZE des éoliennes | Champs agricoles | | Chemins agricoles | | Total des personnes permanentes exposées dans la zone d'effet |
|------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | |
| F1 | 78,54 | 0,79 | 1,03 | 0,10 | 0,89 |
| F2 | 78,54 | 0,79 | 0,75 | 0,07 | 0,86 |
| F3 | 78,54 | 0,79 | 1,53 | 0,15 | 0,94 |
| F4 | 78,54 | 0,79 | 0,75 | 0,07 | 0,86 |

8.2.4.2. Intensité

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 (rayon de 500 m autour des éoliennes).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de projection de pales ou d'éléments de pales dans le cas du parc éolien planifié, sachant que d est le degré d'exposition, ZI la zone d'impact, ZE la zone d'effet, R la longueur de pale et LB la largeur maximale de la pale.

Tableau 56 : Intensité de la chute de projection de pales ou de fragments de pales

| Zone d'impact en m ² | Zone d'effet du phénomène étudié en m ² | Degré d'exposition du phénomène en % | Intensité |
|---------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------|
| $ZI = R * LB / 2$ | $ZE = \pi * r^2$ | $d = ZI / ZE$ | |
| 114 | 785 398 | 0,01 % | Exposition modérée |

8.2.4.3. Gravité

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre 2005, il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de projection, dans la zone de 500 mètres autour de l'éolienne :

- Plus de 1000 personnes exposées → « Gravité désastreux » ;
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Gravité catastrophique » ;
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Gravité importante » ;
- Moins de 10 personnes exposées → « Gravité sérieuse » ;

- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Gravité modérée ».

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 57 : Gravité en cas de projection de pales ou fragments de pales

| Eolienne | Nombre de personnes permanentes exposées | Gravité |
|----------|--|---------|
| F1 | = OU < 1 | Modérée |
| F2 | = OU < 1 | Modérée |
| F3 | = OU < 1 | Modérée |
| F4 | = OU < 1 | Modérée |

8.2.4.4. Probabilité

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

Tableau 58 : Probabilité de projection de pales ou de fragments de pales

| Source | Fréquence | Justification |
|---|----------------------|---|
| Site specific hazard assessment for a wind farm project [4] | 1×10^{-6} | Respect de l'Eurocode EN 1990 – Basis of structural design |
| Guide for risk based zoning of wind turbines [5] | $1,1 \times 10^{-3}$ | Retour d'expérience au Danemark (1984-1992) et en Allemagne (1989-2001) |
| Specification of minimum distances [6] | $6,1 \times 10^{-4}$ | Recherche Internet des accidents entre 1996 et 2003 |

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

Le retour d'expérience français montre également 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).

Ces événements correspondent également à la définition 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.

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 ».

8.2.4.5. Acceptabilité

Avec une classe de probabilité D, le risque de projection de tout ou d'une partie de pale pour chaque éolienne est évalué comme acceptable dans le cas d'un nombre équivalent de personnes permanentes inférieur à 1 000 dans la zone d'effet.

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

Tableau 59 : Niveau d'acceptabilité des risques en cas de projection de pales ou de fragments de pales

| Eolienne | Gravité | Niveau de risque |
|----------|---------|------------------|
| F1 | Modérée | Acceptable |
| F2 | Modérée | Acceptable |
| F3 | Modérée | Acceptable |
| F4 | Modérée | Acceptable |

Ainsi, pour le parc éolien de Fère-Champenoise le phénomène de projection de tout ou de parties de pale des éoliennes constitue un risque acceptable pour les personnes.

8.2.5. Projection de glace

8.2.5.1. 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 dommages sur des personnes ou des biens.

En ce qui concerne la distance maximale atteinte par ce type de projectiles, il n'existe pas d'information dans l'accidentologie. Pour les études de danger de parcs éoliens les références proposent une distance d'effet qui est 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 en cas de givre ou de glace) :

$$DE = 1,5 \times (h + d)$$

$$DE = 1,5 (91,5 + 117) = 313 \text{ mètres}$$

Cette distance de projection est jugée conservatrice dans des études postérieures. A défaut de données fiables, il est proposé de considérer cette formule pour le calcul de la distance d'effet pour les projections de glace.

Pour le parc éolien de Fère-Champenoise, la zone d'effet est donc :

$$ZE = \pi \times DE^2$$

$$ZE = \pi \times 500^2 = 307\,779 \text{ m}^2$$

Dans le cas du scénario de projection de glace, les zones d'effet sont principalement composées de champs agricoles et de chemins agricoles (voir carte suivante). La D 43 qui est la route la plus projet du projet se situe à plus d'un kilomètre de l'éolienne F4.

La [circulaire du 10 mai 2010](#) relative aux règles méthodologiques applicables aux études de dangers indique que les champs agricoles correspondent à des terrains non aménagés et très peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 100 hectares) et que les chemins agricoles correspondent à des terrains aménagés mais peu fréquentés (on compte alors 1 personne par tranche de 10 hectares).



Dans le cadre du projet éolien de Fère-Champenoise on comptabilise donc aux niveaux des différentes zones d'effet pour le scénario de projection de glace :

Tableau 60 : Nombre de personnes permanentes exposées dans le cadre du scénario de projection de glace

| ZE des éoliennes | Champs agricoles | | Chemins agricoles | | Total des personnes permanentes exposées dans la zone d'effet |
|------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | Ha | Nb de personnes permanentes exposées | |
| F1 | 30,78 | 0,31 | 0,55 | 0,05 | 0,36 |
| F2 | 30,78 | 0,31 | 0,40 | 0,04 | 0,35 |
| F3 | 30,78 | 0,31 | 0,89 | 0,09 | 0,40 |
| F4 | 30,78 | 0,31 | 0,42 | 0,04 | 0,35 |

8.2.5.2. Intensité

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, sachant que d est le degré d'exposition, ZI la zone d'impact, ZE la zone d'effet, h la hauteur au moyeu, et SG la surface majorante d'un morceau de glace.

Tableau 61 : Intensité en cas de projection de glace

| Hauteur de moyeu en m | Zone d'effet du phénomène étudié en m ² | Zone d'impact en m ² | Degré d'exposition du phénomène en % | Intensité |
|-----------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| H | $ZE = \pi * DE^2$ | $ZI = SG$ | $d = ZE/ZI$ | |
| 91,5 | 307 779 | 1 | 0,0003 % | Exposition modérée |

8.2.5.3. Gravité

En fonction de cette intensité, 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 → « Gravité désastreuse » ;
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Gravité catastrophique » ;
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Gravité importante » ;

- Moins de 10 personnes exposées → « Gravité sérieuse » ;
- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Gravité modéré ».

Il a été observé dans la littérature disponible 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.

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

Tableau 62 : Gravité en cas de projection de glace

| Eolienne | Nombre de personnes permanentes exposées | Gravité |
|----------|--|---------|
| F1 | = ou < 1 | Modérée |
| F2 | = ou < 1 | Modérée |
| F3 | = ou < 1 | Modérée |
| F4 | = ou < 1 | Modérée |

8.2.5.4. Probabilité

Au regard de la difficulté d'établir un retour d'expérience précis sur cet événement et considérant des éléments suivants :

- les mesures de prévention de projection de glace imposées par [l'arrêté du 26 août 2011](#)
- le recensement d'aucun accident lié à une projection de glace

Une probabilité forfaitaire « B – événement probable » est proposée pour cet événement.

8.2.5.5. Acceptabilité

Le risque de projection pour chaque aérogénérateur est évalué comme acceptable dans le cas d'un niveau de gravité « sérieux ». Cela correspond pour cet événement à un nombre équivalent de personnes permanentes inférieur à 10 dans la zone d'effet.

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

Tableau 63 : Niveau d'acceptabilité des risques en cas de glace

| Eolienne | Gravité | Niveau de risque |
|-----------------|----------------|-------------------------|
| F1 | Modérée | Acceptable |
| F2 | Modérée | Acceptable |
| F3 | Modérée | Acceptable |
| F4 | Modérée | Acceptable |

Ainsi, pour le parc éolien de Fère-Champenoise le phénomène de projection de glace constitue un risque acceptable pour les personnes.

8.3. Synthèse de l'analyse détaillée des risques

8.3.1. Tableaux de synthèse des scénarios étudiés

Le tableau suivant récapitule, pour chaque événement redouté retenu, les paramètres de risques ; c'est-à-dire la cinétique, l'intensité, la gravité et la probabilité. Ainsi, il montre les risques et leurs gravités pour chaque éolienne du projet éolien planifié.

Tableau 64 : Synthèse de l'analyse des risques

| Scénario | Zone d'effet [m] | Cinétique | Intensité | Probabilité | Gravité | |
|--------------------------------|--|-----------|--------------------|--|---------|----------|
| Effondrement de l'éolienne | Disque dont le rayon correspond à une hauteur totale de la machine en bout de pale | Rapide | Exposition modérée | D | F1 | Modérée |
| | | | | | F2 | Modérée |
| | | | | | F3 | Modérée |
| | | | | | F4 | Modérée |
| Chute de glace | Zone de survol | Rapide | Exposition modérée | A (sauf si les températures hivernales sont supérieures à 0°C) | F1 | Modérée |
| | | | | | F2 | Modérée |
| | | | | | F3 | Modérée |
| | | | | | F4 | Modérée |
| Chute d'éléments de l'éolienne | Zone de survol | Rapide | Exposition forte | C | F1 | Sérieuse |
| | | | | | F2 | Sérieuse |
| | | | | | F3 | Sérieuse |
| | | | | | F4 | Sérieuse |
| Projection de pales | Cercle de rayon de 500 m autour des éoliennes | Rapide | Exposition modérée | D | F1 | Modérée |
| | | | | | F2 | Modérée |
| | | | | | F3 | Modérée |
| | | | | | F4 | Modérée |
| Projection de glace | Cercle de rayon de $1,5 \times (H + 2R)$ autour des éoliennes | Rapide | Exposition modérée | B (sauf si les températures hivernales sont supérieures à 0°C) | F1 | Modérée |
| | | | | | F2 | Modérée |
| | | | | | F3 | Modérée |
| | | | | | F4 | Modérée |

8.3.2. Synthèse de l'acceptabilité des risques

Enfin, la dernière étape de l'étude détaillée des risques consiste à rappeler l'acceptabilité des accidents potentiels pour chacun des phénomènes dangereux étudiés.

Pour conclure sur l'acceptabilité des risques, la matrice d'évaluation ci-dessous, adaptée de la circulaire du 29 septembre 2005, sera utilisée.

| Gravité des conséquences | Classe de Probabilité | | | | |
|--------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | E | D | C | B | A |
| <i>Désastreux</i> | Yellow | Red | Red | Red | Red |
| <i>Catastrophique</i> | Yellow | Yellow | Red | Red | Red |
| <i>Important</i> | Yellow | Yellow | Yellow | Red | Red |
| <i>Sérieux</i> | Green | Green | Yellow | Yellow | Red |
| <i>Modéré</i> | Green | Green | Green | Green | Yellow |

| Niveau de risque | Couleur | Acceptabilité |
|---------------------------|---------|-----------------------|
| <i>Risque très faible</i> | Green | <i>acceptable</i> |
| <i>Risque faible</i> | Yellow | <i>acceptable</i> |
| <i>Risque important</i> | Red | <i>non acceptable</i> |

| Éoliennes | F1 | F2 | F3 | F4 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| <i>Effondrement de l'éolienne</i> | Green | Green | Green | Green |
| <i>Chute de glace</i> | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| <i>Chute d'éléments de l'éolienne</i> | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| <i>Projection de pales</i> | Green | Green | Green | Green |
| <i>Projection de glace</i> | Green | Green | Green | Green |

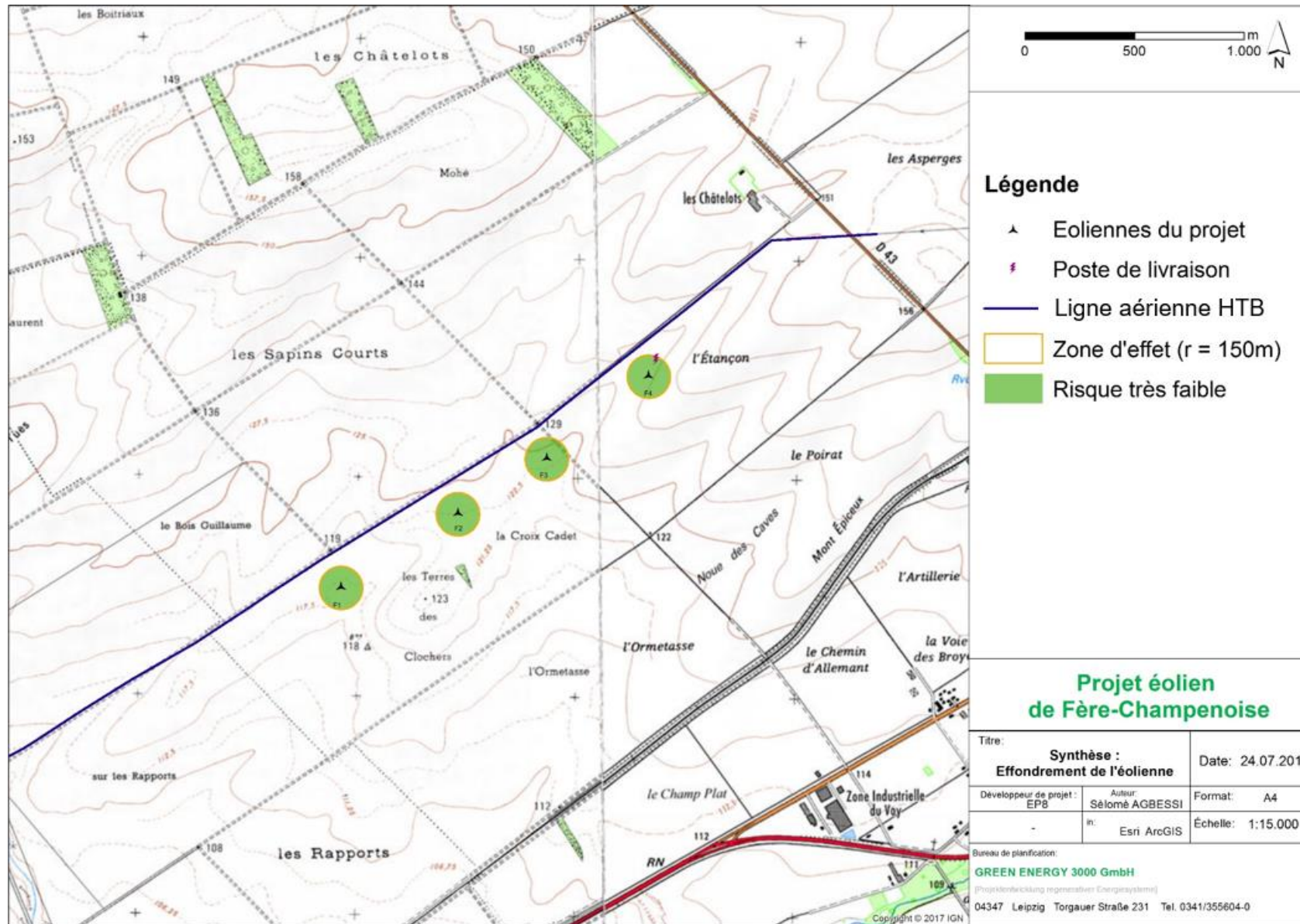
L'analyse détaillée des risques montre qu'aucun scénario ne représente une source de danger importante dont la gravité des conséquences serait catastrophique, désastreuse ou même importante. De plus, de nombreuses mesures de sécurité seront mises en place au niveau des éoliennes et du parc planifié, ce qui réduit les risques de manière importante (voir point 7.6.).

8.3.3. Cartographie des risques

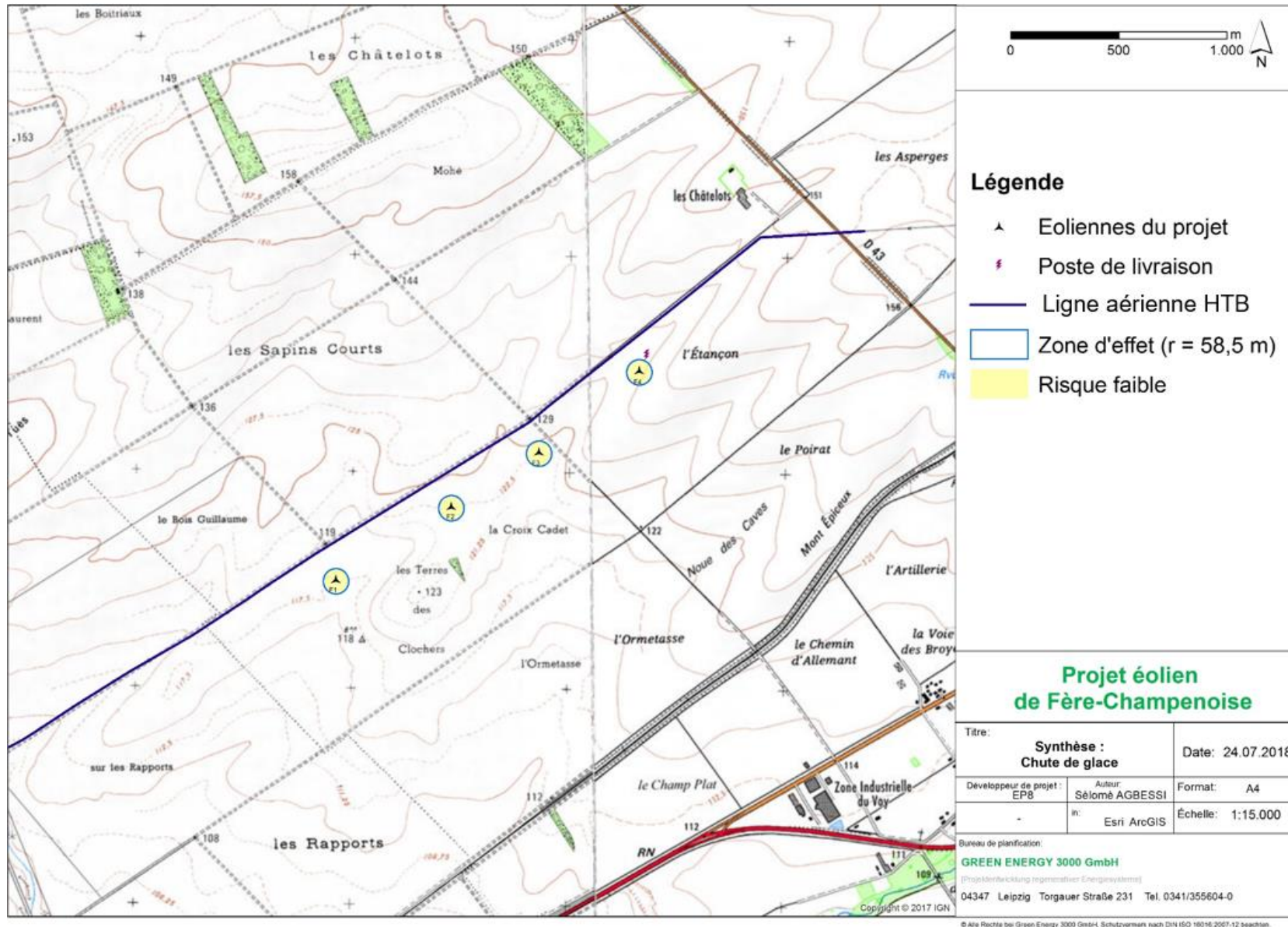
Les cartes ci-après présentent la probabilité d'apparition de chaque événement étudié dans l'analyse détaillée des risques, c'est-à-dire :

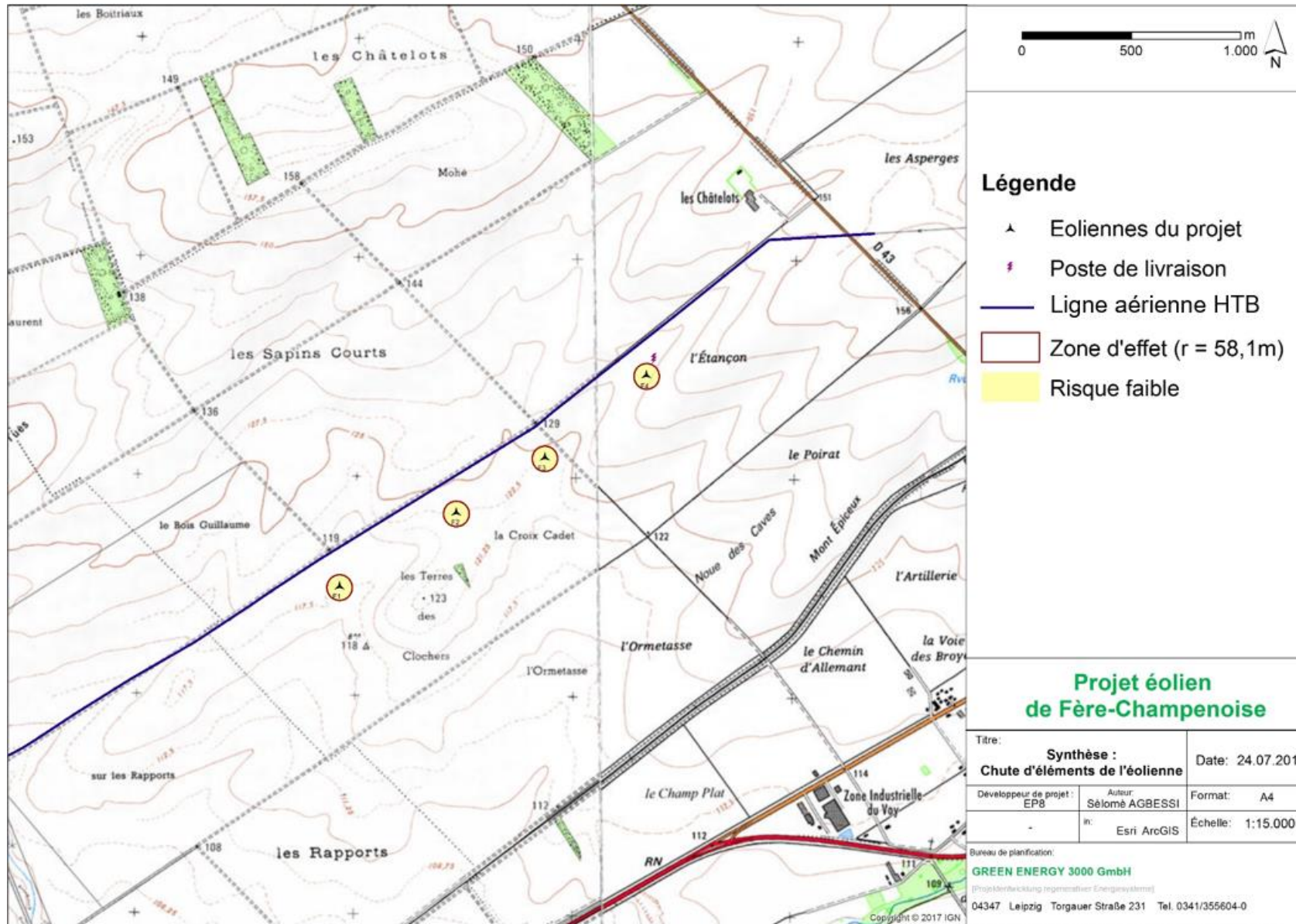
- Effondrement de l'éolienne ;
- Chute de glace ;
- Chute d'éléments de l'éolienne ;
- Projection de pales ;
- Projection de glace.

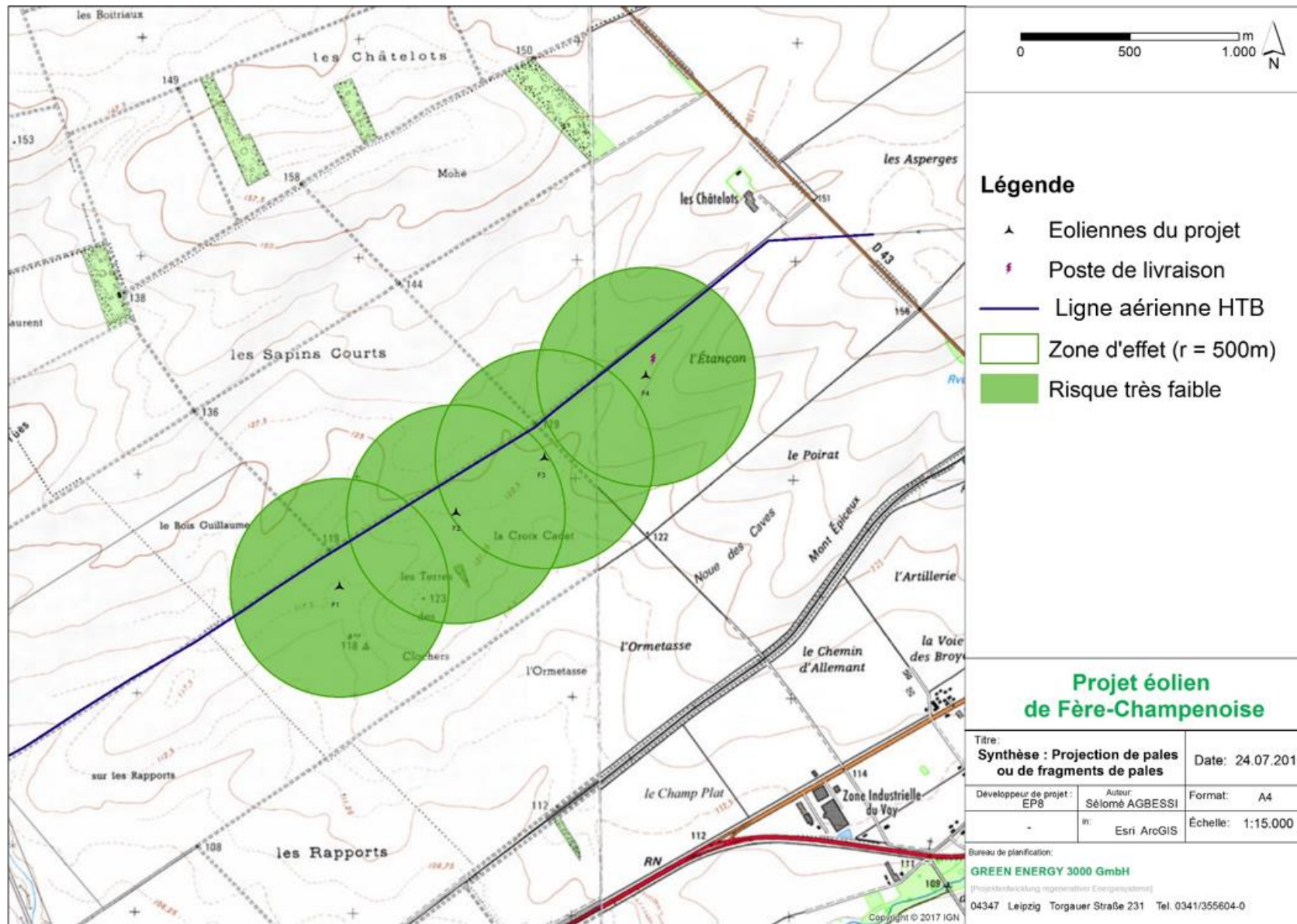
Comme analysé précédemment, pour chaque scénario étudié, le risque est acceptable.

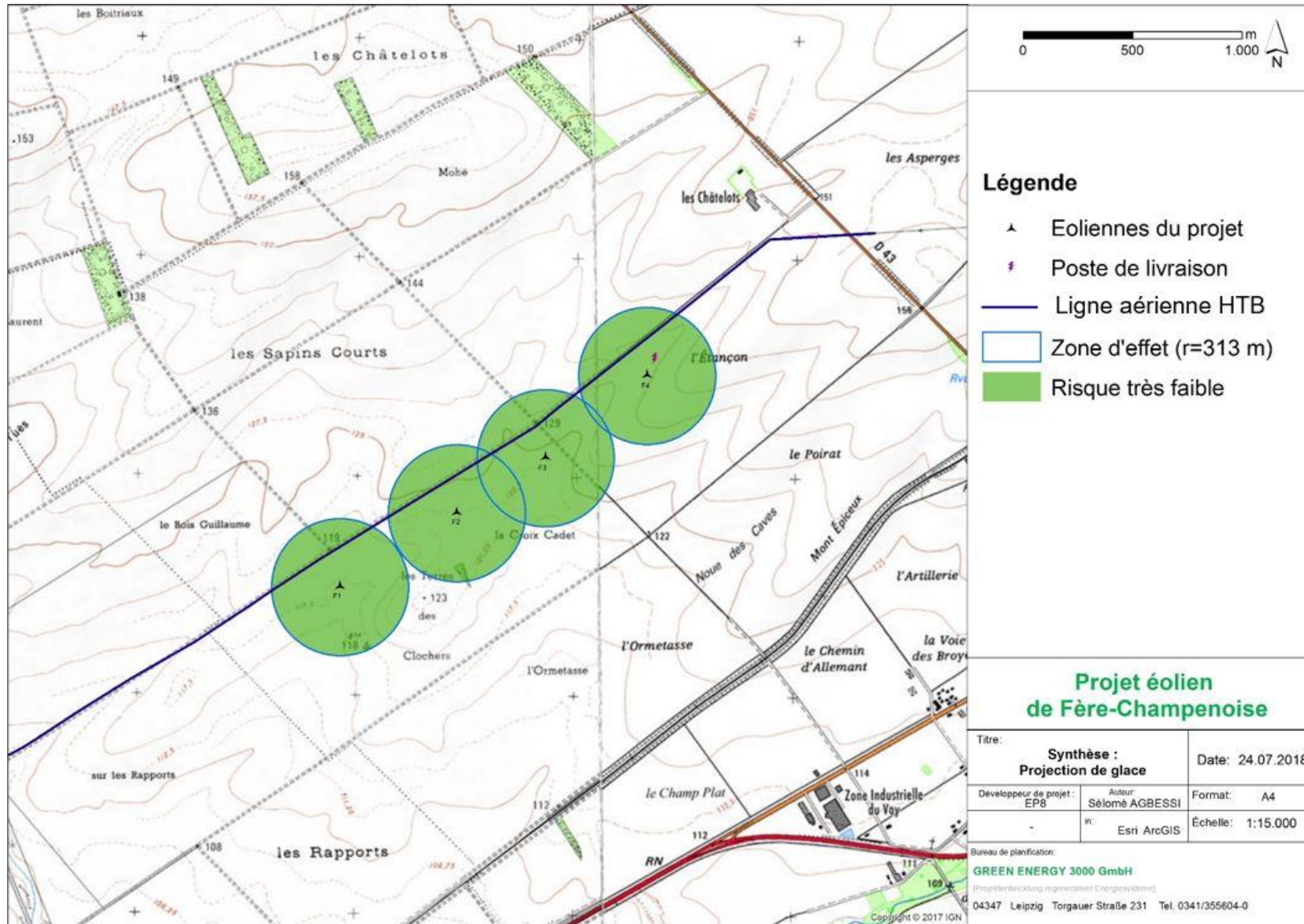


© Alle Rechte bei Green Energy 3000 GmbH. Schutzvermerk nach DIN ISO 16016:2007-12 beachten.









8.3.4. Cartographie par éolienne des zones d'effets des différents scénarios étudiés

Les cartes ci-après présentent pour chaque éolienne les zones d'effets des différents scénarios étudiés à savoir :

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

L'objectif est d'apprécier les enjeux présents autour de chaque aérogénérateur. Comme analysé précédemment, pour chaque scénario étudié, le risque est acceptable.

