

COMMUNE DE COURT  
CANTON DE BERNE



---

Parc éolien de Montoz – Pré Richard

---

# Etude projections de glace (Meteotest)

## Pièce B1-10

---

Indice	Description de l'évolution du document	Date
<i>a</i>	<i>Version pour Information et participation</i>	12.04.2016
<i>b</i>	<i>Dépôt public</i>	11.04.2018
<i>c</i>		





# Projet d'énergie éolienne Montoz-Pré Richard

Étude de la chute de glace depuis les éoliennes, analyse de risque et mesures recommandées pour la minimisation des risques

## Mentions légales

Client	Energie Service Biel/Bienne
Interlocuteur	Davide Crotta
Adresse	4, rue de Gottstatt CP 4263 2500 Bienne
Date	26.03.2018
Version actuelle	Rapport final
Versions antérieures	-
Numéro de projet	17_082
Fichier	Eisfallgutachten_WP_MontozPreRichard_2018.V3_3.docx
Rédigé par	Dr. Stefan Müller
Contrôlé par	26.03.2018   Saskia Bourgeois
Approuvé par	26.03.2018   René Cattin
Garantie	Meteotest garantit à ses clients une exécution soignée et dans les règles de l'art de son mandat. Toute responsabilité, en particulier pour les dommages causés par le défaut, est exclue dans la mesure permise par la loi.

## Résumé

Ce rapport examine le phénomène de **chute de glace** pour le **parc éolien de Montoz-Pré Richard**. Ce parc éolien comprend **sept turbines** avec un diamètre de rotor de 126 m et une hauteur de moyeu de 117 m.

Pour la modélisation de la chute de glace, on a utilisé la version la plus récente du **modèle SWIM V2.1** mis au point par Meteotest (Simple Windturbine Icethrow Model). Le modèle est décrit au chapitre 3.

La **méthode** utilisée pour analyser le risque est présentée au chapitre 4.

Le chapitre 5 décrit les **données** utilisées pour la modélisation de la chute de glace, comme la configuration du parc éolien et les voies de communication ainsi que les paramètres d'éolienne, les conditions météorologiques locales et le nombre escompté de morceaux de glace.

Les **résultats de la modélisation de la chute de glace** sont représentés sous forme graphique au chapitre 6. La fréquence d'impact à proximité de chaque éolienne est fonction de la distance à l'éolienne: elle est maximale dans la zone située en dessous du rotor et décroît de manière logarithmique à mesure que l'on s'éloigne du pied de l'installation. La zone à risque dépend en grande partie des vents dominants et se situe entre 80 m au nord-ouest de l'éolienne et 270 m au nord-est de l'éolienne.

Les **tronçons impactés dans et autour du parc éolien** sont ensuite soumis à une analyse de risque détaillée (chapitre 7) et basée sur la modélisation de la chute de glace. Dans le cadre de cette analyse de risque, on prend en compte le taux de fréquentation des tronçons par des personnes d'une part. D'autre part, on distingue **trois groupes de personnes**: le groupe 1 traverse **une fois par an** le parc éolien, le groupe 2 y passe **une fois par semaine** et le groupe 3 habite ou travaille dans les environs du parc éolien et s'y trouve **chaque jour**.

Pour la **plupart des tronçons examinés**, le risque est **acceptable** et n'est **élevé** que dans quelques rares cas. Le risque est le plus grand pour le groupe de personnes 3 qui passe beaucoup de temps dans la région du parc éolien. Des mesures destinées à minimiser les risques sont mentionnées au chapitre 8.

La conclusion (chapitre 9) reprend les **principaux résultats de la modélisation de la chute de glace**. Un **fonctionnement sans danger du parc éolien est possible** à condition de s'appuyer sur un concept d'exploitation qui inclut des mesures appropriées.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Nomenclature</b> .....	<b>7</b>
2.1	Impact de glace, chute de glace et projection de glace .....	7
2.2	Risque collectif et individuel .....	7
2.3	Mortalité endogène minimale (MEM).....	7
<b>3</b>	<b>Modèle d'impact de glace SWIM</b> .....	<b>8</b>
3.1	Description du modèle .....	8
3.2	Modes de fonctionnement spéciaux.....	10
3.4	Résultats de la modélisation SWIM.....	11
3.5	Nombre et répartition par taille des morceaux de glace.....	12
3.6	Validation des résultats du modèle SWIM.....	13
<b>4</b>	<b>Méthodologie de l'analyse de risque</b> .....	<b>15</b>
4.1	Calcul du risque .....	15
4.2	Acceptabilité des risques .....	16
4.3	Énergie cinétique fatale et taille des morceaux de glace .....	17
<b>5</b>	<b>Données pour la modélisation de la chute de glace</b> .....	<b>18</b>
5.1	Caractéristiques du site.....	18
5.2	Paramètres d'éolienne .....	20
5.3	Météorologie et périodes de givrage .....	20
5.4	Nombre estimé de morceaux de glace sur le site de Montoz-Pré Richard .....	24
<b>6</b>	<b>Résultats de la modélisation de la chute de glace</b> .....	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Analyse de risque pour des tronçons dans la région du parc éolien de Montoz-Pré Richard</b> .....	<b>26</b>
7.1	A) Chemins souvent utilisés .....	27
7.1.1	(A1) Accès à la bergerie de Court par le sud .....	27
7.1.2	(A2) Chemin d'accès à la bergerie de Court par le nord-est .....	28
7.1.3	(A3) Chemin de communication entre la bergerie de Court et Pré Richard.....	29
7.1.4	(A4) Tronçon au nord de T07 jusqu'à la ferme de Pré Richard ....	30
7.1.5	(A5) Chemin entre Pré Richard et La Bluée.....	31
7.2	(B) Chemins rarement utilisés .....	32
7.2.1	(B1) Chemin de Pré Richard au nord de T06.....	32
7.2.2	(B2) Chemin depuis la route près de La Bluée au sud-est de T04 et T07 .....	33
<b>8</b>	<b>Mesures possibles pour minimiser les risques</b> .....	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>35</b>

<b>A</b>	<b>Graphiques du risque de chute de glace pour tous les sites d'implantation d'éoliennes .....</b>	<b>37</b>
<b>B</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>41</b>

# 1 Introduction

Energie Service Biel/Bienne (ESB) prévoit de réaliser un parc éolien dans la région de Montoz-Pré Richard dans le canton de Berne. Le site se trouve sur la crête du Montoz-Pré Richard à quelque 1300 m d'altitude (Figure 1). Au pied du coteau les localités de Lengnau et Granges se situent au sud voire au sud-est et la commune de Court côté nord. Le projet de parc éolien comprend sept éoliennes.

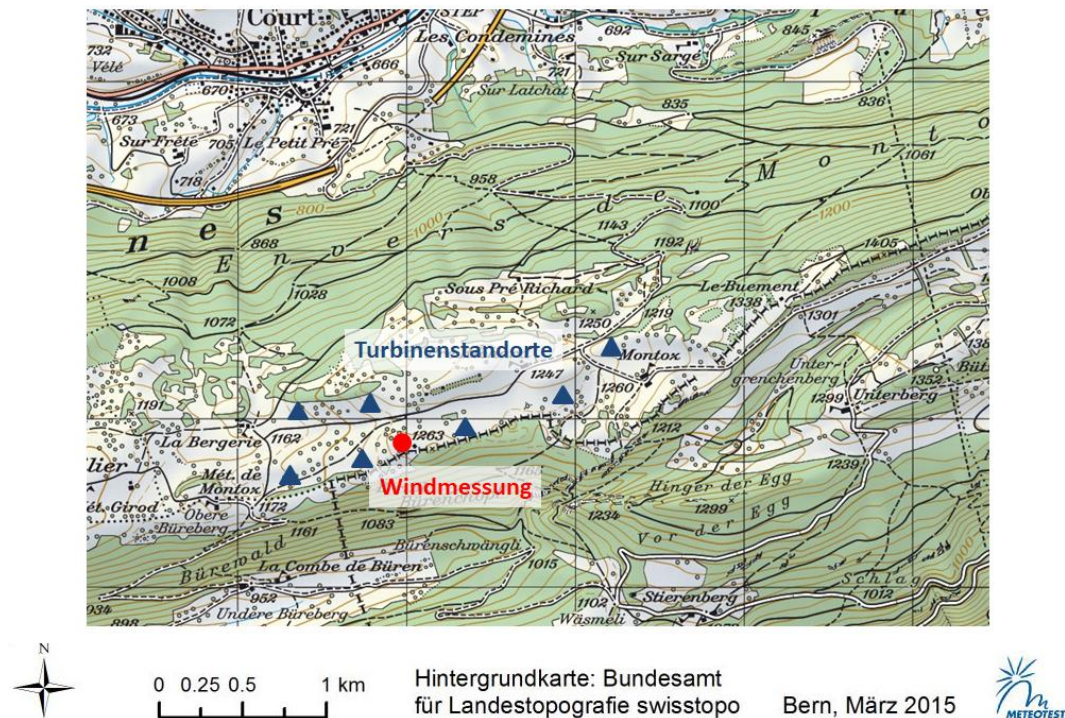


Figure 1: Emplacement du parc éolien sur la crête jurassienne de Montoz-Pré Richard. Le point rouge indique le site de mesure des vents (mât de mesure et LIDAR). Les triangles bleus marquent l'emplacement des futures turbines.

En hiver, le site de Montoz-Pré Richard est touché par le givre et de la glace peut donc se former sur les éoliennes. Lorsque la turbine est à l'arrêt et que la glace se détache de la turbine et tombe à terre, on parle de chute de glace. La chute de glace d'une éolienne peut constituer un facteur de risque pour les personnes qui se tiennent à proximité des turbines.



## 2 Nomenclature

### 2.1 Impact de glace, chute de glace et projection de glace

On utilise le terme de **chute de glace** lorsqu'une éolienne est hors service ou à l'arrêt et celui de **projection de glace** pour une éolienne en fonctionnement. Dans le cas d'une chute de glace, un morceau de glace se détache et tombe de l'éolienne arrêtée. En cas de projection, le morceau de glace est projeté à une vitesse de démarrage qui correspond à celle de la pale du rotor. Le terme générique employé pour ces deux événements est **impact de glace**

### 2.2 Risque collectif et individuel

Le risque collectif est le risque global encouru par toutes les personnes impactées dans le cadre d'une analyse de risque. Le risque pour un individu n'est toutefois pas connu. Le risque individuel est le risque auquel une personne est exposée.

### 2.3 Mortalité endogène minimale (MEM)

Le principe de la mortalité endogène minimale (MEM)<sup>1</sup> sert à mesurer le risque (inévitables) accepté de mourir à cause d'un danger potentiel. La MEM est utilisée principalement comme le seuil de risque absolu dans le cadre de l'homologation de systèmes complets. La MEM est la plus faible pour les jeunes. Statistiquement, la mortalité ( $R_m$ ) d'un jeune européen est:

$$R_m = 2 \times 10^{-4} \text{ décès/(personne/an)}$$

---

<sup>1</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Minimale\\_endogene\\_Mortalitat](https://de.wikipedia.org/wiki/Minimale_endogene_Mortalitat)

## 3 Modèle d'impact de glace SWIM

### 3.1 Description du modèle

Meteotest a étudié pendant plusieurs années l'accrétion de glace sur les pales de rotor d'une éolienne avec un moyeu de 46 m de haut et un diamètre de rotor de 40 m, sur le Güttsch au-dessus d'Andermatt dans les Alpes suisses et mesuré puis documenté les morceaux de glace projetés. Il a été constaté ce faisant que 2/3 des morceaux de glace pesaient moins de 200 g. 50 % des morceaux de glace ont été trouvés dans un périmètre de 20 m (correspondant au rayon du rotor) autour du pied de l'éolienne. Les fragments extrêmes, pertinents pour une analyse de risque, pesaient 1,8 kg et ont été découverts à 92 m de l'éolienne [1]).

Par la suite, Meteotest a personnellement mis au point le modèle d'impact de glace SWIM (**S**imple **W**indturbine **I**cethrow **M**odel) qui calcule la trajectoire d'un morceau de glace jusqu'à son impact sur le sol en se basant sur les conditions météorologiques sur le site ainsi que sur les paramètres de l'éolienne.

À l'aide de séries temporelles de la vitesse et de la direction du vent, le modèle est capable de calculer la fréquence de chute de glace dans le périmètre de l'éolienne. Dans le même temps, on procède à une simulation pour chaque moment donné de la série temporelle. Lorsqu'il existe en outre des données concernant l'apparition de givre sur le site, la chute de glace n'est simulée que pour les périodes durant lesquelles du givrage a été observé.

La vitesse d'un morceau de glace est identique à la vitesse de la pale du rotor au moment où il est projeté. La vitesse peut être calculée à partir de la vitesse de rotation et du rayon. Pendant le vol, le morceau de glace est soumis à la gravité, à la résistance de l'air qui freine les particules, ainsi qu'à la force du vent qui le dévie de sa trajectoire. Le principe de fonctionnement du modèle est esquissé dans la Figure 2 (cf. également [2]). La vitesse de rotation du rotor est réglée sur 0 rotation par minute pour une éolienne à l'arrêt (chute de glace).

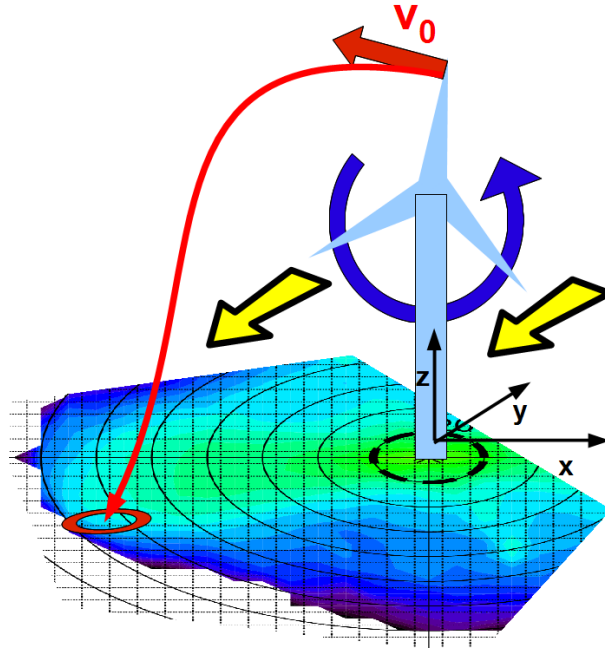


Figure 2: Représentation schématique du modèle de l'impact de glace. La flèche bleue représente le sens de rotation du rotor. Les flèches jaunes indiquent la direction du vent. La ligne rouge matérialise la trajectoire d'un morceau de glace entre la projection et l'impact, en tenant compte du déport dû au vent.  $v_0$  correspond à la vitesse de projection qui dépend de la vitesse de rotation du rotor. La surface colorée au pied de l'éolienne représente la fréquence d'impacts de morceaux de glace: vert = fréquence d'impact élevée, bleu/violet = fréquence d'impact faible.

La modélisation s'appuie sur les hypothèses ci-après:

1. Les morceaux de glace ont une forme parallélépipédique.
2. Les calculs de l'impact de glace ne sont réalisés que pour des périodes durant lesquelles les conditions de givrage sont réunies.
3. Les débris de glace tournent dans l'air de telle sorte que chaque face du parallélépipède de glace est fouettée par le vent et freinée par la résistance de l'air.
4. Des morceaux de glace sont projetés depuis une position quelconque sur la pale du rotor (du pied à l'extrémité) pendant toute la rotation à 360° de la pale de rotor (Figure 3).
5. Lorsque l'éolienne est à l'arrêt et que de la glace tombe, la vitesse de rotation est réglée sur zéro pour la simulation.
6. L'éolienne tourne toujours dans le sens du vent dans le modèle.

7. La topographie n'est pas prise en considération. La modélisation est réalisée sur l'hypothèse d'une surface horizontale.

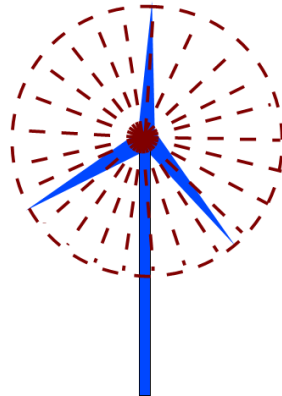


Figure 3: Pour chaque position de rotation que peut prendre une pale de rotor, on fait tomber, ou projette, un morceau de glace du pied de la pale jusqu'à l'extrémité. La largeur de pas est de 6 m le long de la pale du rotor et de 12 degrés pour l'angle de rotation.

La modélisation est répétée pour un nombre de plusieurs millions de morceaux de glace. Il est ainsi possible de déterminer statistiquement la fréquence d'impact de morceaux de glace dans le périmètre d'une éolienne.

### 3.2 Modes de fonctionnement spéciaux

**Position parking:** il est possible de configurer le modèle de façon à ce que l'éolienne soit «parquée» dans un angle azimut fixe pour que les pales de rotor se trouvent à une distance maximale d'une route. La fixation est renforcée lorsque la force des vents dépasse 15 m/s [3], afin d'éviter tout dommage mécanique de la turbine.

### 3.3 Grandeurs initiales pour la modélisation

Le Tableau 1 énumère les grandeurs initiales qui sont nécessaires pour la modélisation.

Tableau 1: Bases météorologiques, paramètres d'éolienne et caractéristiques du site requises comme grandeurs initiales pour le modèle SWIM.

Grandeur	Unité	Type de paramètre
Vitesse du vent	[m/s]	Paramètres météorologiques (séries temporelles)
Direction du vent	[°]	
Température	[°C]	
Rayon du rotor	[m]	Paramètres d'éolienne
Hauteur de moyeu	[m]	

Densité de la glace	[kg/m <sup>3</sup> ]	Paramètres de la glace
Dimensions x–y–z du morceau de glace	[m]	
Rugosité de la surface terrestre	[m]	Caractéristiques du site

Les paramètres météorologiques sont généralement des données mesurées. Les paramètres d'éolienne doivent être fournis par le constructeur. Les paramètres de la glace donnent des détails sur la taille et la densité des morceaux de glace pour lesquels les calculs sont effectués. Les caractéristiques du site (rugosité de la surface terrestre) sont données par la couverture végétale et la topographie.

Une distinction est faite entre la glace claire (ou verglas) formée par la pluie verglaçante, le givre formé par du brouillard, et la neige mouillée. En fonction des influences de la météorologie, il se forme ainsi de la glace avec une densité variable. La densité varie entre 600 et 900 kg/m<sup>3</sup>.

Lors de conditions givrantes, le risque d'impact de glace est calculé pour chaque pas de temps de la série de données météorologiques.

### 3.4 Résultats de la modélisation SWIM

Pour les simulations de chute de glace, on compte les impacts dans chaque pixel de 5 m x 5 m. On obtient ainsi la distribution spatiale de la fréquence d'impact autour d'une éolienne. La fréquence d'impact d'un morceau de glace d'une taille spécifique est ramenée au nombre d'impacts au kilomètre carré et par an [fréquence d'impact/m<sup>2</sup> et par an].

La fréquence d'impact est constituée des éléments suivants:

- ***p<sub>Impact</sub>***: distribution spatiale de la fréquence d'impact relative. C'est la probabilité qu'un morceau de glace tombe dans le m<sup>2</sup> correspondant (résultat de SWIM2.1).
- ***p<sub>Distribution</sub>***: distribution du poids des morceaux de glace. Cette distribution a été déduite à partir des recensements effectués sur le site de Gütsch au-dessus d'Andermatt ainsi que dans le Jura, à Saint-Brais et au Mont-Crosin. Le Tableau 2 indique les fréquences relatives pour diverses catégories de poids.
- ***N***: nombre de morceaux de glace par an. Il s'agit d'une estimation réalisée en s'appuyant sur les recensements effectués au Gütsch à Saint-Brais et au Mont-Crosin.

La distribution spatiale de la fréquence d'impact ***T*** est le produit de la multiplication de ces trois paramètres:

$$T = N * p_{Distribution} * p_{Impact}$$

Une échelle logarithmique est utilisée pour la représentation spatiale des fréquences d'impact afin d'obtenir une visualisation graphique facile à lire. La légende montre le logarithme décimal des fréquences d'impact par mètre carré et par an. Cela signifie que la probabilité qu'un endroit avec une valeur de -4 ( $P = 10^{-4}$ ) a cent fois moins de chance d'être impacté qu'un endroit avec une valeur de -2 ( $10^{-2}$ ). Dans un mètre carré avec la valeur -4, un chiffre de  $10^{-4}$  impacts par mètre carré et par an est donc à prévoir. Ceci signifie en d'autres termes qu'un morceau de glace tombe tous les 10 000 ans dans ce mètre carré.

### 3.5 Nombre et répartition par taille des morceaux de glace

La distribution des morceaux de glace pour calculer les fréquences d'impact a été déterminée en s'appuyant sur les études de terrain faites sur les sites de Gütsch au-dessus d'Andermatt, Saint-Brais et Mont-Crosin (Tableau 2). On a mesuré et documenté 226 morceaux de glace près de l'éolienne avec un diamètre de rotor de 40 m sur le Gütsch lors des comptages effectués sur quatre hivers. À Saint-Brais avec des éoliennes d'un diamètre de rotor de 82 m, on a relevé environ 2800 morceaux de glace près de deux turbines sur une durée de trois hivers. Au Mont-Crosin, ce sont 98 morceaux de glace qui ont été découverts autour de l'éolienne avec un diamètre de rotor de 90 m.

Des études de terrain, telles que celles de Gütsch, Saint-Brais et Mont-Crosin [1], [4], [5] mais aussi du projet Icethrower [6], fournissent des informations importantes sur la nature et la fréquence des morceaux de glace chutant des éoliennes.

Ces études de terrain sont réalisées systématiquement sur une longue période. Malgré tout, elles présentent des insuffisances. Par exemple, une visite sur le terrain juste après un impact est parfois impossible en raison des mauvaises conditions météorologiques. Tant que l'éolienne n'est pas visible à cause du brouillard, une visite est trop dangereuse, car il est impossible d'exclure la chute d'autres morceaux de glace.

Il arrive par ailleurs qu'on sous-estime l'impact lorsque de la nouvelle neige tombe recouvre les morceaux de glace avant la visite sur le terrain. Les glaçons peuvent se fragmenter lorsqu'ils tombent sur le sol ; ils peuvent également grossir lorsqu'ils chutent dans la neige et qu'un peu de neige se dépose dessus ultérieurement puis gèle.

Les études de terrain disponibles ne peuvent pas faire la différence entre chute de glace et projection de glace car il est souvent impossible de déterminer si l'éolienne était en mouvement ou non lorsqu'ils sont tombés.

Dans de nombreux cas, on ne trouve pas les morceaux de glace exactement tels qu'ils sont tombés. C'est la raison pour laquelle on tient compte d'un facteur d'incertitude lors de l'estimation du nombre de morceaux de glace par an.

L'incertitude est plus forte pour les morceaux de glace de petite taille car il est plus facile de ne pas les repérer sur le terrain. Le nombre de glaçons de grande taille a été probablement mieux documenté.

L'incertitude pour le nombre de morceaux de glace a été évaluée au facteur 5 pour les débris jusqu'à 500 g, au facteur 2 pour les débris jusqu'à 2,2 kg et au facteur 1,2 pour les débris plus lourds. Cela donne un total de quelque 15 000 morceaux de glace sur une période de onze hivers et donc environ 1375 morceaux de glace par turbine et par an. Toutes les catégories de poids ont été ici prises en considération. Étant donné que plus de 90 % des morceaux de glace documentés proviennent d'une turbine de Saint-Brais avec un diamètre de rotor de 82 m, nous estimons que ce chiffre constitue une référence pour une turbine de taille comparable à celle du site de Saint-Brais.

Le Tableau 2 montre les fréquences relatives de différentes tailles de morceaux de glace établies à partir des études de terrain de Gütsch au-dessus d'Andermatt, Saint-Brais et Mont-Crosin ([1] [5] [7] [8]).

Tableau 2: Fréquences relatives de différentes tailles de morceaux de glace établies d'après les recensements de morceaux de glace de Gütsch au-dessus d'Andermatt, Saint-Brais et Mont-Crosin. La dernière colonne indique le nombre estimé de morceaux de glace par hiver compte tenu de l'incertitude et ramené à une turbine avec un diamètre de rotor de 82 m.

Poids [g]	Nombre total de morceaux	Part de la totalité [%]	Nombre normé [1/hiver/an]
>0g	3100	100%	1'375
>50g	900	29%	400
>100g	650	20%	275
>500g	266	8.5%	120
>2'200g	25	0.8%	2

### 3.6 Validation des résultats du modèle SWIM

La Figure 4 montre la distribution de fréquence des morceaux de glace trouvés sur un site et les résultats correspondants du modèle. Les données indiquées comprennent la projection de glace et la chute de glace.

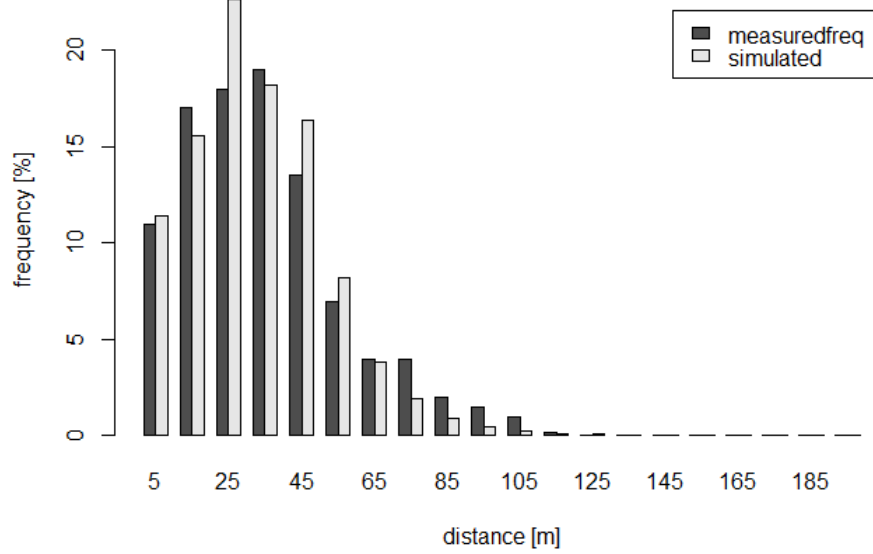


Figure 4: SWIM V2.1: distribution de fréquence des morceaux de glace trouvés (en noir) et des morceaux de glace simulés (en gris).

Les calculs réalisés avec le modèle SWIM V2.1 permettent de reproduire avec réalisme la distribution de fréquence de l'étude de terrain. Le maximum de fréquence se situe à des mesures autour de 30 à 35 m pour un diamètre de rotor de 82 m.



## 4 Méthodologie de l'analyse de risque

### 4.1 Calcul du risque

Le risque se compose du danger («hazard») et de la durée d'exposition dans la zone à risque («exposure»).

$$\text{Risque} = \text{Hazard} \times \text{Exposure}$$

Dans notre cas, le «hazard» est défini par la distribution spatiale de la fréquence d'impact décrite dans la section 3.4 [impacts par m<sup>2</sup> et par an].

L'«exposure» se compose de la durée de présence ou d'exposition dans la zone à risque ( $P_{\text{exposuretime}}$ ) et de la possibilité d'une période de givrage ( $P_{\text{icingtime}}$ ). Toutes deux sont des grandeurs relatives [temps/an].

$$P_{\text{Exposure}} = P_{\text{icingtime}} * P_{\text{exposuretime}}$$

Afin de calculer le risque lié à un chemin, on multiplie pour chaque mètre carré du chemin la distribution spatiale de la fréquence d'impact («hazard»:  $T[i,j]$ ) par la durée d'exposition («exposure»:  $P_{\text{Exposure}}[i,j]$ ) (Figure 5). Les valeurs sont ensuite additionnées le long d'un tronçon du chemin. La formule utilisée est la suivante:

$$\text{Risque} = \sum T[i, j] * P_{\text{Exposure}}[i, j]$$

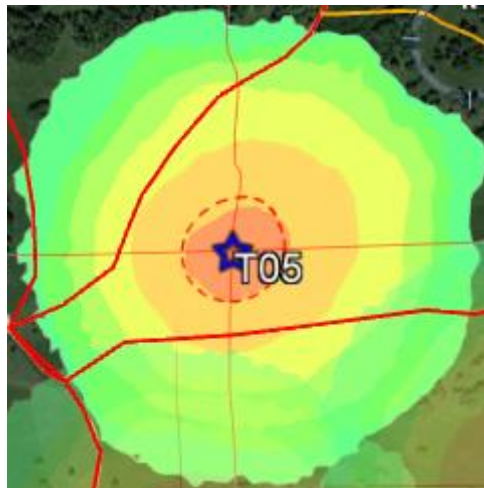


Figure 5: Exemple d'intersection de la distribution spatiale de la fréquence d'impact (surface colorée autour de l'éolienne) avec des tronçons de chemins (traits rouges) autour d'une éolienne.

## 4.2 Acceptabilité des risques

Il existe plusieurs méthodes utilisées de par le monde pour déterminer le risque acceptable, mais toutes aboutissent en définitive à un résultat comparable, à savoir un seuil d'acceptabilité de l'ordre de  $10^{-5}$  par an. L'étude de Bredesen [9] suppose un seuil d'acceptabilité de  $10^{-4}$  impacts par mètre carré et par an pour les personnes qui sont exposées tout au long de l'année dans les régions de randonnée. Une décision judiciaire en Allemagne [10] définit un seuil d'acceptabilité de  $3 \cdot 10^{-5}$ . La probabilité de mourir lors d'un accident de la route est de  $10^{-5}$ <sup>2</sup>. Selon le critère de la MEM, il s'ensuit également un seuil d'acceptabilité de  $10^{-5}$ . Ces chiffres seront abordés plus en détail par la suite.

Pour l'analyse de risque concernant la chute de glace, on examine le **risque individuel** pour une personne (cf. section 2.2). Le principe de mortalité endogène minimale (MEM, section 2.3) sert à mesurer le risque accepté d'être tué par une source de danger potentielle. La MEM pour un jeune européen moyen ( $R_m = 2 \cdot 10^{-4}$ ) est souvent utilisée comme seuil de risque absolu dans le cadre de l'homologation de nouveaux systèmes. Les nouveaux systèmes ne doivent en principe pas entraîner une augmentation notable de  $R_m$ .

Toute personne étant exposée simultanément à plusieurs risques, on fixe une valeur seuil réduite de  $0,05 \cdot R_m$  par système. En ce qui concerne le risque individuel, la **valeur seuil «de non-acceptabilité»** pour un nouveau système est donc  $R = 10^{-5}$  [décès/(personne et par an)]. Cela signifie que le **risque est inacceptable** lorsque le résultat de l'analyse de risque est plus élevé (Tableau 3).

Si la valeur pour le risque se situe entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  [décès/(personne et par an)], le **risque est important** et des mesures visant à le minimiser sont nécessaires. Pour un risque situé entre  $10^{-7}$  et  $10^{-6}$  [décès/(personne et par an)], le **risque est tolérable** et des mesures ne devraient être appliquées qu'en fonction d'un principe de coût-efficacité. Si le risque est inférieur à  $10^{-7}$  [décès/(personne et par an)], alors le **risque est acceptable** (Tableau 3).

Tableau 3: Fourchettes d'acceptabilité du risque individuel. Rouge: le risque est inacceptable. Orange et jaune: des mesures sont recommandées afin de minimiser le risque. Vert: le risque est faible et donc acceptable.

Risque individuel [décès/(personne et par an)]	Estimation
$10^{-5} < X$	Le risque est inacceptable
$10^{-6} < X < 10^{-5}$	Le risque est important / des mesures de minimisation des risques sont nécessaires
$10^{-7} < X < 10^{-6}$	Le risque est tolérable / envisager des mesures dans un rapport de coût-efficacité
$X < 10^{-7}$	Le risque est acceptable

<sup>2</sup> Office fédéral de la statistique, Suisse

Afin de pouvoir mieux cerner ces chiffres, le Tableau 4 montre des exemples de probabilités de décès pour des risques individuels auxquels nous sommes exposés dans notre quotidien et notre vie professionnelle.

Tableau 4: Probabilités de décès pour divers risques quotidiens et professionnels pour un individu<sup>3</sup> (risque individuel).

Menace	Nombre de morts par million d'habitants	Probabilité (ordre de grandeur) décès/(personne et par an)
Foudre	1 à 10/an	10 <sup>-6</sup>
Automobiliste sur la route	30 à 60/an	10 <sup>-5</sup>
Motocycliste	*	10 <sup>-4</sup>
Pilote d'hélicoptère	*	10 <sup>-3</sup>
Industrie chimique	*	10 <sup>-4</sup>
Ouvrier du bâtiment	*	10 <sup>-4</sup>

\* aucune valeur disponible

### 4.3 Énergie cinétique fatale et taille des morceaux de glace

Des morceaux de glace avec une énergie cinétique supérieure à 40 joules, respectivement un poids de 100 g [3] sont considérés comme fatals pour les personnes qui sont impactées sans aucune protection. Ce chiffre est repris pour la présente analyse de risque.

L'énergie cinétique dépend de la masse et de la vitesse finale d'un morceau de glace. La vitesse finale découle de la trajectoire du modèle et de la vitesse au moment de l'impact sur le sol. Pour des morceaux de glace de 100 g, elle se situe dans une fourchette entre 20 et 28 m/s, suivant la densité de la glace et la vitesse des vents dominants. Avec une vitesse finale de 28 m/s et un poids de 100 g, on atteint une énergie de près de 40 joules.

<sup>3</sup> Sources: [http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrstod#Vergleich\\_europäischer\\_Staaten](http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrstod#Vergleich_europäischer_Staaten)  
Office fédéral de la statistique, Suisse  
<http://www.unwetter.de/pages/extremwahr.php>

## 5 Données pour la modélisation de la chute de glace

### 5.1 Caractéristiques du site

La Figure 6 montre la configuration du parc éolien avec ses sept éoliennes planifiées. Trois bâtiments habités se trouvent dans la région du parc éolien à des distances comprises entre 270 et 300 m de l'éolienne la plus proche. Le Tableau 5 indique les coordonnées des sept éoliennes ainsi que celles des mesures des vents.

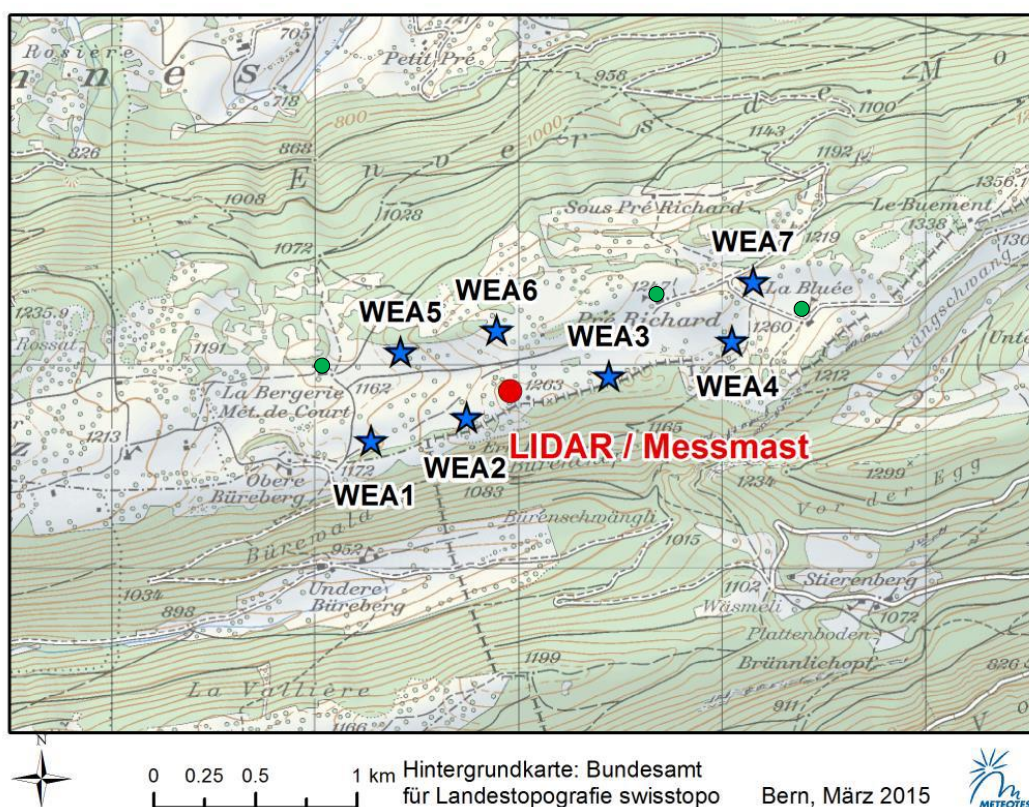


Figure 6: Parc éolien de Montoz-Pré Richard: éoliennes (étoiles bleues), mesures des vents (point rouge), bâtiments habités (points verts).

Tableau 5: Site de mesure des vents et emplacement des éoliennes planifiées dans le parc éolien de Montoz-Pré Richard (coordonnées géographiques CH1903 MN03).

Éolienne	X [m]	Y [m]	Altitude au-dessus de la mer [m]
Mesure au mât / LIDAR	592'948	229'870	1'245
Éolienne T01	592'302	229'628	1'177
Éolienne T02	592'745	229'744	1'219
Éolienne T03	593'422	229'975	1'232
Éolienne T04	593'978	230'113	1'231
Éolienne T05	592'370	230'050	1'177
Éolienne T06	592'839	230'125	1'241
Éolienne T07	594'172	230'417	1'245

La Figure 7 fournit une vue d'ensemble des voies de communication pour les piétons et les véhicules dans la région du parc éolien.

**Les chemins utilisés fréquemment** sont tracés en orange. On suppose que **cent personnes en moyenne** les empruntent chaque jour en hiver. En ce qui concerne les **chemins rarement utilisés** (en vert), on suppose que **10 personnes en moyenne** les empruntent chaque jour en hiver.

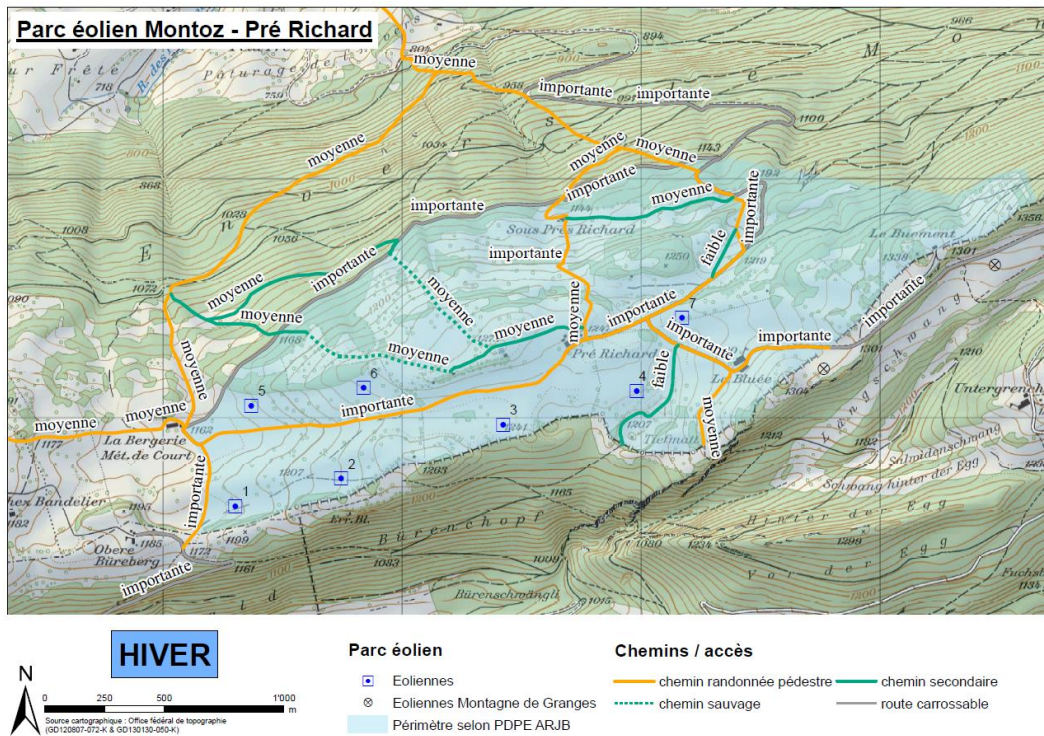


Figure 7: Voies de communication dans la région du parc éolien: chemins souvent utilisés (en orange), rarement utilisés (en vert) et routes carrossables (en gris) (graphique fourni par le client).

## 5.2 Paramètres d'éolienne

Des éoliennes avec un diamètre de rotor de 126 m et une hauteur de moyeu de 117 m sont prévues. Le constructeur des installations propose des systèmes de détection de glace et de chauffage des pales de rotor [11] pour ce type de turbine.

## 5.3 Météorologie et périodes de givrage

Les mesures au mât et les mesures par LIDAR sur le site de Montoz mettent à disposition des données sur la vitesse et la direction des vents avec des capteurs chauffés et non chauffés. Par ailleurs, les mesures au mât fournissent également des données sur la température et l'humidité relative. Il est possible de déterminer les conditions de givrage locales dans la région en se basant sur ces diverses données. Tous les chiffres relatifs aux vents et aux températures sont des moyennes calculées toutes les 10 minutes. Le Tableau 6 donne une vue d'ensemble des mesures pertinentes et des grandeurs de mesure relevées pour la présente étude.

Tableau 6: Données de base météorologiques.

Site	Hauteur de mesure [m]	Capteur	Chauffage	Période de temps	Grandeurs de mesure
Mesure au mât	81.3	Thies First Class	non	26.9.2013 – 4.5.2015	Vent Température Humidité
Mesure au mât	73.3	NRG IceFree3	oui	26.9.2013 – 4.5.2015	Vent
Mesure LI-DAR	40 – 200		–	12.12.2014 – 3.6.2015	Vent

Les périodes de givrage ont été déterminées sur la base des critères suivants:

1. La température est inférieure à 2 °C.
2. Le rapport entre la vitesse du vent du capteur chauffé (NRG IceFree3 à 73,3 m) et du capteur non chauffé (Thies First Class à 81,3 m) est supérieur à 1,5.
3. La vitesse du vent du capteur chauffé (NRG IceFree3) est supérieure à 2 m/s.

Les conditions susmentionnées ont été réunies pendant 12 % du temps. La série temporelle des trois paramètres – température, humidité relative et vitesse du vent – est représentée dans la Figure 8.

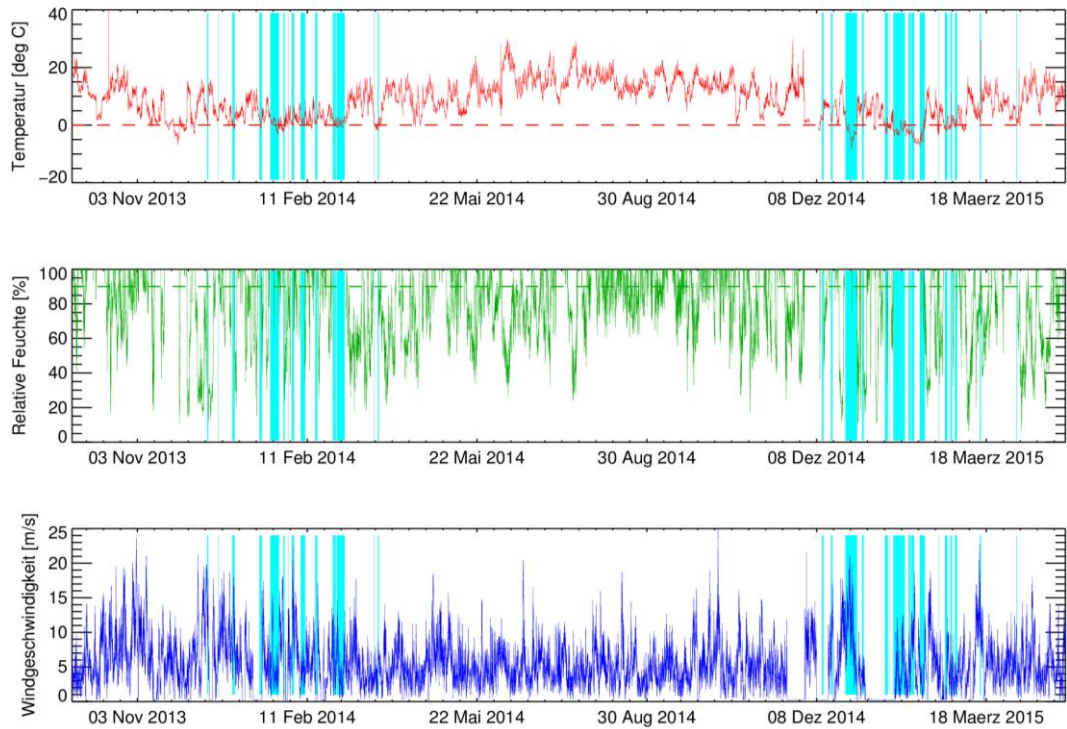


Figure 8: Séries temporelles de la température, de l'humidité relative et de la vitesse du vent du capteur chauffé à 73,3 m. Les surfaces en bleu clair à l'arrière-plan représentent les périodes durant lesquelles les conditions givrantes sont réunies.

Le profil vertical de la vitesse du vent sur le site a été défini en se basant sur les mesures par LIDAR. La rugosité sur le site a été calculée à l'aide de vitesses du vent à diverses hauteurs entre 40 m et 200 m au moyen d'un profil logarithmique du vent (Figure 9):

$$v(z) = v_r \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}}$$

On obtient ainsi une longueur de rugosité de 1,3 m sur le site de Montoz-Pré Richard.



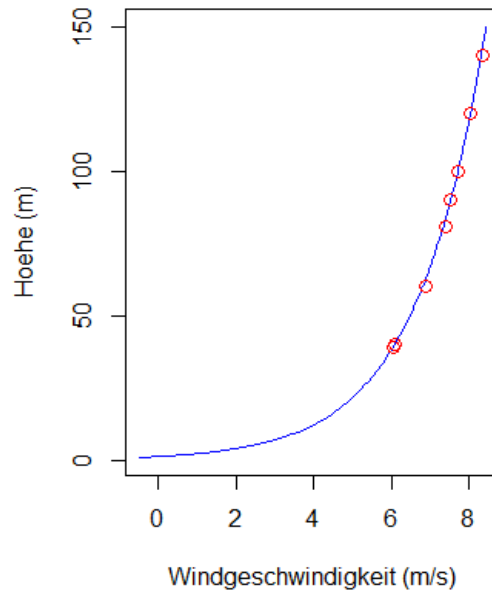


Figure 9: Profil vertical du vent (en bleu) utilisé pour la simulation de chutes de glace sur la base de mesures par LIDAR (points rouges).

La Figure 10 montre les roses des vents pour la totalité de la période de mesure de septembre 2013 à mai 2015 (à gauche) et pour les périodes avec des conditions de givrage (à droite). La vitesse moyenne du vent pour toute la période de mesure se situe à 6,9 m/s à 117 m au-dessus du sol. La direction principale du vent est sud-ouest ; les vents plus forts proviennent également de la même direction.

Lorsque les conditions de givrage étaient réunies, on a également enregistré des vents venant du nord-ouest et du nord. Les vents forts proviennent toutefois en grande partie du sud-ouest. Pour la modélisation de la chute de glace, on se sert des statistiques du vent telles que mesurées au mât pour représenter l'ensemble des sites d'implantation d'éoliennes.

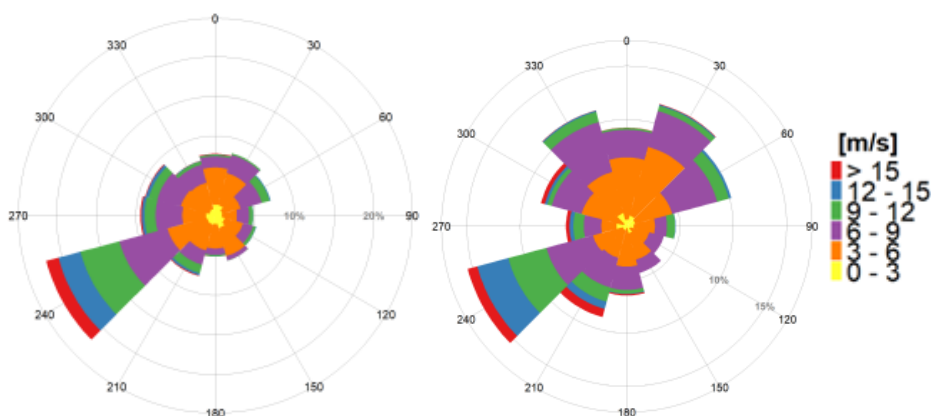


Figure 10: À gauche: rose des vents sur le site de Montoz-Pré Richard pour toute la période de mesure. À droite: rose des vents pour les périodes avec des conditions de givrage. Les vents forts supérieurs à 15 m/s (en rouge) proviennent en grande partie de l'ouest et du sud-ouest.

## 5.4 Nombre estimé de morceaux de glace sur le site de Montoz-Pré Richard

Dans la section 3.5, le nombre et la répartition par taille des morceaux de glace estimés sont indiqués pour une éolienne de référence. Ces chiffres doivent être ajustés aux conditions de givrage locales et aux dimensions d'éolienne.

La période de temps avec des conditions météorologiques de givrage possible se situe à 12 % sur le Gütsch et à 14 % à Saint-Brais. Les conditions sur le site de Montoz sont comparables à celles à Saint-Brais, ce qui explique pourquoi aucun facteur de correction n'est ici utilisé (80 % des morceaux de glace proviennent de l'étude de terrain réalisée à Saint-Brais).

Le diamètre de rotor projeté dans le parc éolien de Montoz-Pré Richard est toutefois de 126 m, c'est-à-dire deux fois plus grand que celui de l'éolienne de référence. Le nombre de morceaux de glace est extrapolé de façon linéaire par rapport aux pales plus longues du rotor. On suppose dans ce cas que si les pales de rotor sont 50 % plus longues, on a alors 50 % de morceaux de glace en plus.

On dénombre ainsi 600 morceaux de glace par an de plus de 50 g sur le site de Montoz-Pré Richard ainsi que **415 morceaux de glace pesant plus de 100 g** par an et par éolienne.

## 6 Résultats de la modélisation de la chute de glace

Pour calculer les chutes de glace, on a choisi une distribution en fonction de la masse des morceaux de glace conformément au Tableau 2 (section 3.5). On a pris en compte des morceaux de glace d'au moins 100 g pour faire ces calculs car les morceaux de plus petite taille ne sont pas considérés comme étant fatals [9].

On a également procédé à une simulation dans le mode de fonctionnement «Position parking» avec l'éolienne T07. Les pales de rotor sont alors alignées parallèlement au tronçon du chemin au nord de l'installation.

La Figure 11 montre la distribution spatiale des fréquences d'impact pour la chute de glace dans la zone du parc éolien. Les voies de communication sont marquées en rouge et orange.

Les fréquences d'impact sont les plus importantes dans les zones situées sous les rotors avec  $10^{-2}$  [impacts/m<sup>2</sup> et par an]. Les distances maximales pour la chute de glace sont de 270 m, étant entendu que ces extrêmes, avec  $10^{-7}$  [impacts/m<sup>2</sup> et par an], sont des événements extrêmement rares et qui ne surviennent qu'en cas de tempête, lorsque plus personne ne se trouve généralement dehors.

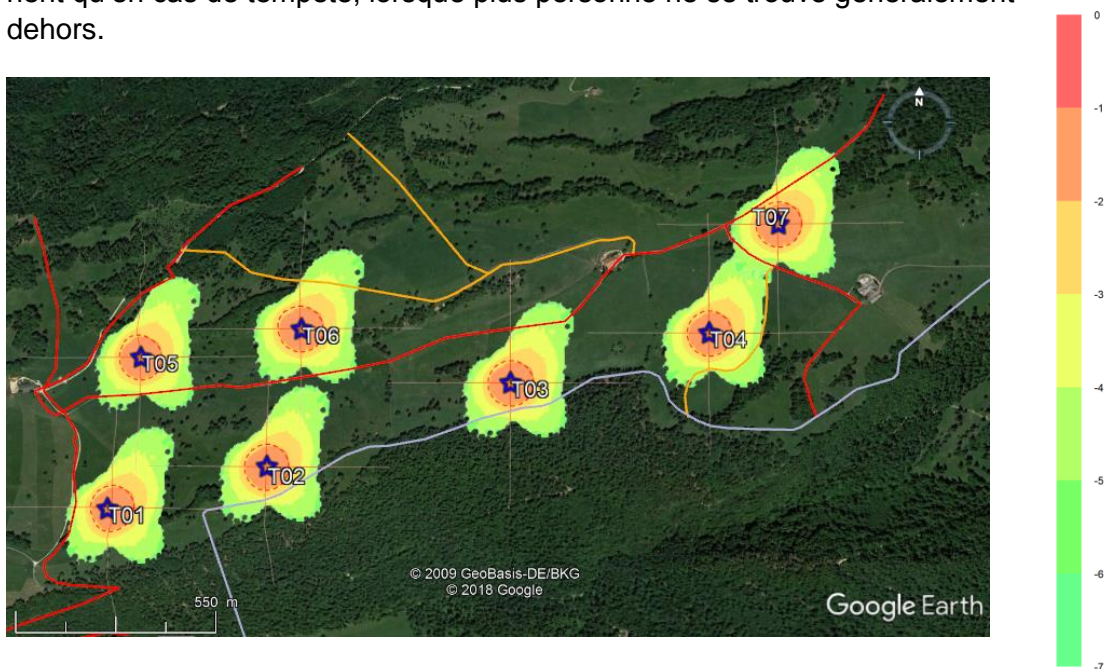


Figure 11: Distribution spatiale de la **fréquence d'impact de chute de glace** [impacts/(m<sup>2</sup> et par an)] dans la région du parc de de Montoz-Pré Richard. Attention, l'échelle est logarithmique. Les chemins de randonnée pédestre hivernaux sont tracés en rouge (souvent utilisés) et en orange (rarement utilisés). Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

Les résultats pour chacune des installations peuvent être consultés dans l'annexe A.

## 7 Analyse de risque pour divers tronçons de chemin parcourant le parc éolien de Montoz-Pré Richard

L'analyse de risque se base sur les hypothèses suivantes:

- Les piétons se déplacent d'un point A vers un point B à une **vitesse de 4 km/h**.
- La partie critique du corps du randonneur étant la **tête**, nous considérons un cercle de **0,5 m de diamètre** comme une surface critique.

On distingue trois groupes de personnes:

- Le groupe 1 traverse **une fois par an** le parc éolien.
- Le groupe 2 passe **une fois par semaine** dans le parc éolien.
- Le groupe 3 habite ou travaille dans les environs du parc éolien et s'y trouve **une fois par jour**.

On analyse ci-après le risque sur cinq **tronçons souvent utilisés (A1-A5)** et deux **tronçons rarement utilisés (B1 et B2)**. Le risque pour les trois groupes de personnes est examiné individuellement et estimé conformément à la section **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Tableau 3.

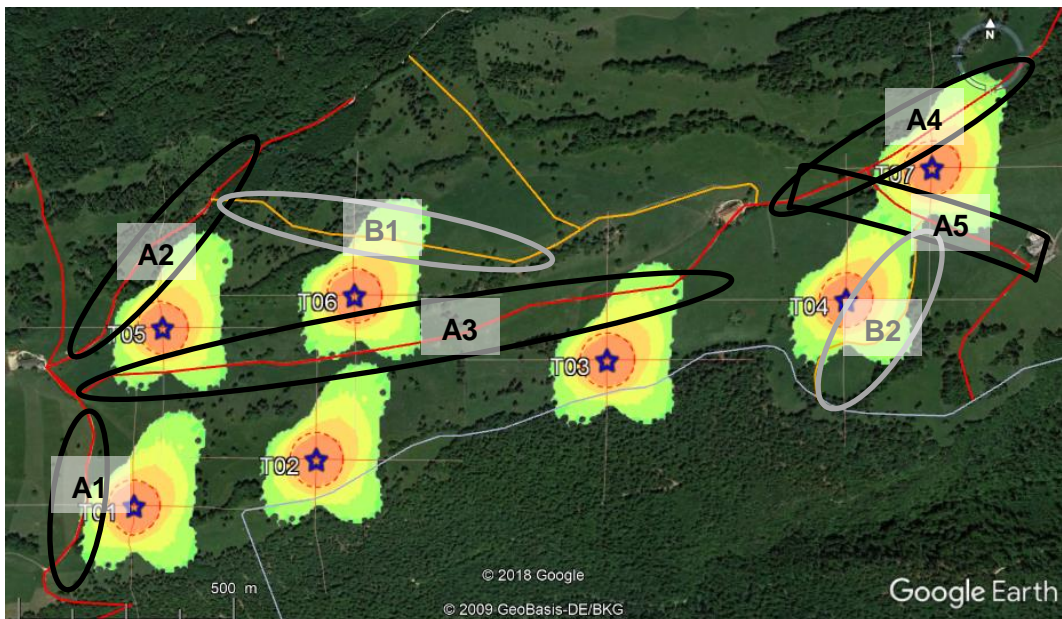


Figure 12: Graphique similaire à la Figure 11. Les tronçons à risque sont encadrés en noir (A: souvent utilisés) et gris (B: rarement utilisés) et numérotés conformément aux sections ci-après.

## 7.1 A) Chemins souvent utilisés

### 7.1.1 (A1) Accès à la bergerie de Court par le sud

Le chemin s'étire à l'ouest de T01. La plus petite distance par rapport à T01 est de 115 m.

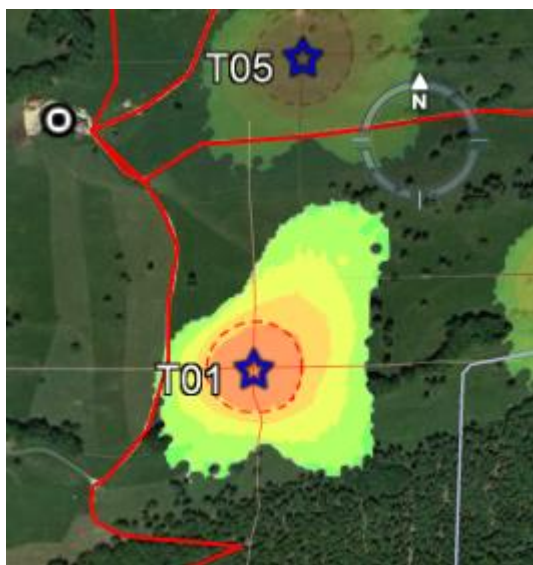


Figure 13: Tronçon à l'ouest de T01. La bergerie de Court (point noir et blanc) se trouve au nord-ouest de T01. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace.

Tableau 7: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon à l'ouest de T01.

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]
1 fois par an	$1.8 \cdot 10^{-10}$
1 fois par semaine	$9.4 \cdot 10^{-9}$
1 fois par jour	$6.6 \cdot 10^{-8}$

### 7.1.2 (A2) Chemin d'accès à la bergerie de Court par le nord-est

Le chemin s'étire au nord-ouest de T05. La plus petite distance par rapport à T05 est de 30 m.

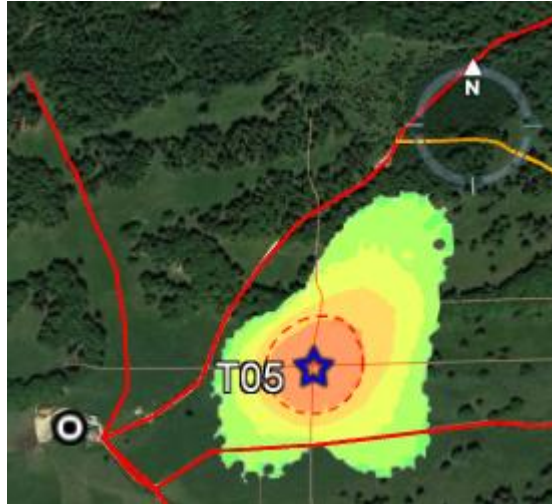


Figure 14: Tronçon au nord-ouest de T05. La bergerie de Court (point noir et blanc) se trouve à l'ouest de T05. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace.

Tableau 8: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon au nord-est de T05.

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]
1 fois par an	0
1 fois par semaine	0
1 fois par jour	0

### 7.1.3 (A3) Chemin de communication entre la bergerie de Court et Pré Richard

Le chemin s'étire en plein cœur du parc éolien, au nord de T01, T02, T03 et T04 ainsi qu'au sud de T05, T06. La plus petite distance par rapport au site d'implantation d'une turbine est de 108 m, près de T05. Pour évaluer les risques, on additionne les risques émanant de toutes les turbines le long du tronçon.

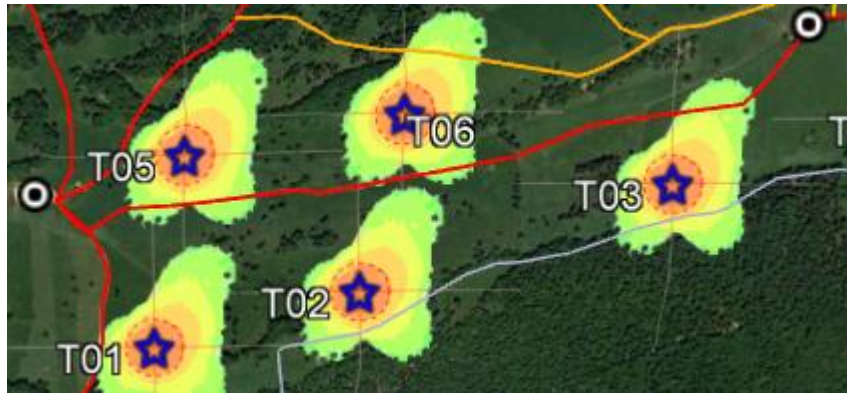


Figure 15: Tronçon à travers le parc éolien entre la bergerie de Court et Pré Richard (en rouge). Les deux fermes sont marquées chacune d'un point noir et blanc. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace. Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

Tableau 9: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon à travers le parc éolien entre la bergerie de Court et Pré Richard.

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]
1 fois par an	$7.53 \cdot 10^{-9}$
1 fois par semaine	$3.91 \cdot 10^{-7}$
1 fois par jour	$2.75 \cdot 10^{-6}$

#### 7.1.4 (A4) Tronçon au nord de T07 jusqu'à la ferme de Pré Richard

Le chemin s'étire au nord de T04 et T07. La plus petite distance par rapport au site d'implantation d'une turbine est de 64 m, près de T07. Pour évaluer les risques, on additionne les risques émanant de toutes les éoliennes le long du tronçon.

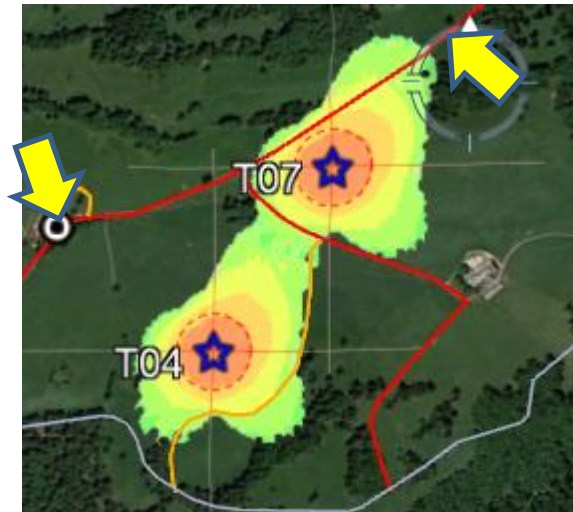


Figure 16: Tronçon au nord de T04 et T07. Les flèches jaunes marquent le point de départ et le point d'arrivée. La ferme de Pré Richard se trouve à gauche au point noir et blanc. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace. Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

Tableau 10: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon au nord de T04 et T07.

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]	Chute de glace avec T07 en position parking [impacts/an]
1 fois par an	$8.4 \cdot 10^{-8}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$
1 fois par semaine	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$
1 fois par jour	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$8.1 \cdot 10^{-6}$



### 7.1.5 (A5) Chemin entre Pré Richard et La Bluée

Le chemin s'étire entre T04 et T07. La plus petite distance par rapport à T07 est de 110 m. Les risques émanant de chacune des éoliennes le long du tronçon sont additionnés.

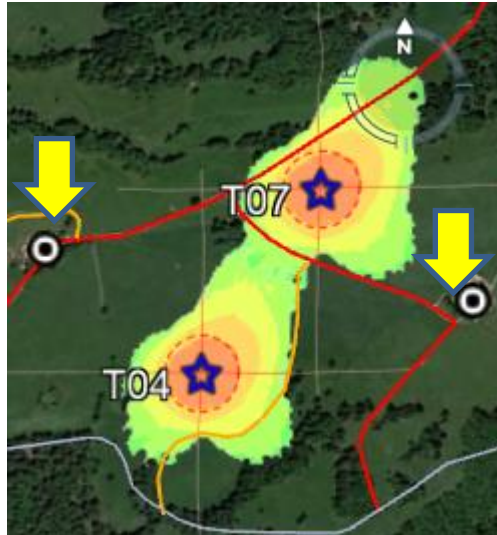


Figure 17: Tronçon entre Pré Richard et La Bluée. Les flèches jaunes marquent les deux fermes. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace. Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

Tableau 11: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon entre Pré Richard et La Bluée

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]	Chute de glace avec T07 en position parking [impacts/an]
1 fois par an	$1.78 \cdot 10^{-9}$	$4.6 \cdot 10^{-9}$
1 fois par semaine	$9.26 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-7}$
1 fois par jour	$6.50 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$

## 7.2 (B) Chemins rarement utilisés

### 7.2.1 (B1) Chemin de Pré Richard au nord de T06

Le tronçon s'étire côté nord de Pré Richard et passe au nord de T03 et T06. La plus petite distance le séparant de ces deux turbines est de 130 m. Il s'agit ici d'un chemin moyennement fréquenté.

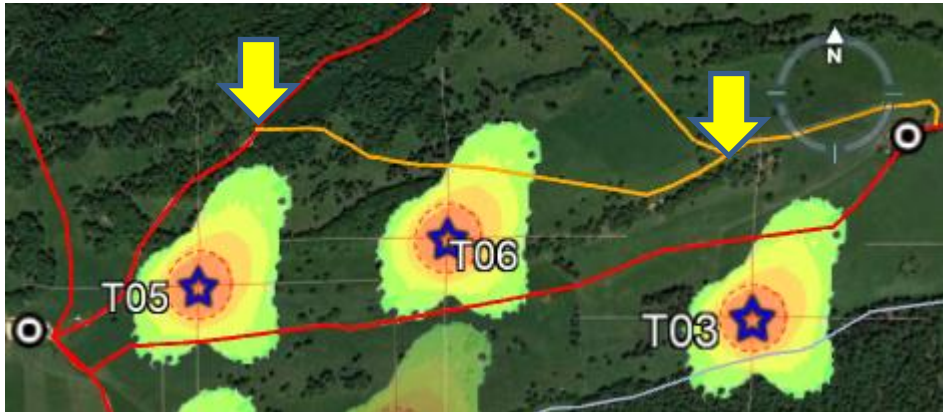


Figure 18: Tronçon entre Pré Richard et La Bluée. Les flèches jaunes marquent le point de départ et le point d'arrivée. Le point noir et blanc à l'est indique la ferme de Pré Richard. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace. Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

Tableau 12: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon au nord-ouest de Pré Richard, T03 et T06.

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]
1 fois par an	$5.88 \cdot 10^{-9}$
1 fois par semaine	$3.06 \cdot 10^{-7}$
1 fois par jour	$2.15 \cdot 10^{-6}$

### 7.2.2 (B2) Chemin depuis la route près de La Bluée au sud-est de T04 et T07

Ce chemin est faiblement fréquenté. La plus petite distance par rapport à T04 est de 100 m. Il s'agit d'un chemin plutôt peu utilisé.

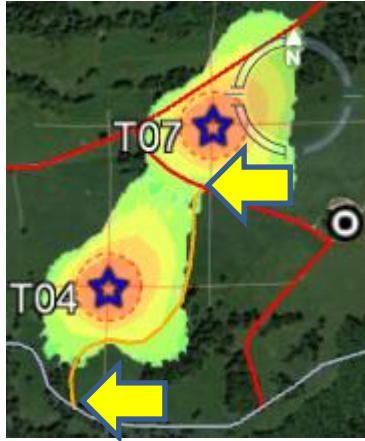


Figure 19: Tronçon au sud-est de T04 et T07. Les flèches jaunes marquent le point de départ et le point d'arrivée. Le graphique représente la fréquence d'impact de chutes de glace. Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

Tableau 13: Évaluation du risque pour un piéton sur le tronçon au sud-est de T04 et T07.

Groupe de personnes	Chute de glace [impacts/an]	Chute de glace avec T07 en position parking [impacts/an]
1 fois par an	$5.63 \cdot 10^{-9}$	$4.57 \cdot 10^{-9}$
1 fois par semaine	$2.93 \cdot 10^{-7}$	$2.37 \cdot 10^{-7}$
1 fois par jour	$2.06 \cdot 10^{-6}$	$1.65 \cdot 10^{-6}$

## 8 Mesures possibles pour minimiser les risques

Il est possible d'éviter que des personnes ne se trouvent dans une zone à risque durant les périodes potentielles de chute de glace grâce à des **mesures d'information**. Les mesures suivantes sont appropriées:

- Panneaux d'information à tous les **points d'accès** au périmètre du parc éolien, qui indiquent le comportement à suivre en cas de givrage.
- **Signalisation et avertisseurs lumineux** sur tous les chemins d'accès. Les avertisseurs ne sont activés que lorsque les éoliennes sont couvertes de givre. Chaque personne qui entre dans le périmètre du parc éolien en empruntant les chemins d'accès officiels sera ainsi clairement avertie du risque de chute de glace.
- L'installation également de panneaux d'information **dans la zone proprement dite du parc éolien**, en plus des panneaux de signalisation, peut s'avérer utile. Les avertisseurs lumineux ne sont plus nécessaires, car la personne se trouvant dans le parc en a déjà vu un à l'entrée.
- Grands **panneaux d'information visibles de loin au pied des turbines** afin que les personnes ne pénètrent pas dans les zones à très grand risque (sous le rayon du rotor).
- Formation des groupes de personnes qui sont présentes quotidiennement dans le parc.
- Il est possible, sur la base de mesures météorologiques locales et du système de détection de glace, de déclencher un **signal d'avertissement** qui est diffusé sur **trois canaux**: avertissements par SMS, activation des avertisseurs lumineux (cf. ci-dessus) et plateformes Internet ou applications Internet pour les appareils mobiles.
- Fermeture de chemins forestiers rarement fréquentés si possible.

Afin de réduire le risque de projection et de chute de glace et de raccourcir la durée des périodes d'impact de glace, les **mesures d'exploitation** suivantes peuvent être prises:

- Installation de détecteurs de glace: ceux-ci permettent de mettre hors service l'éolienne en cas d'accrétion de glace et donc de minimiser le risque de chute de glace.
- Système de dégivrage: un chauffage des pales du rotor permet une fonte et une chute de la glace contrôlées. On réduit ainsi la durée de la période de givrage.
- Placer l'éolienne dans une «position parking» définie: le risque de chute de glace pour un tronçon parallèle à la surface du rotor est ainsi minimisé.

## 9 Conclusion

Des modélisations de la chute de glace ont été réalisées avec le modèle de chute de glace SWIM pour la totalité des sites d'implantation d'éoliennes dans le parc éolien de Montoz-Pré Richard. Le résultat des modélisations est la distribution spatiale de la fréquence d'impact de morceaux de glace (en nombre d'impacts par unité de surface et par an) dans la périphérie de chaque turbine.

Une analyse de risque a été effectuée en se basant sur les résultats de la modélisation de la chute de glace. Une distinction a été faite entre trois groupes de personnes:

- Le groupe 1 traverse **une fois par an** le parc éolien.
- Le groupe 2 passe **une fois par semaine** dans la zone du parc éolien.
- Le groupe 3 habite ou travaille dans les environs du parc éolien et s'y trouve **quotidiennement**.

Le risque pour un **individu** a été calculé en multipliant la durée d'exposition dans une zone à risque par la fréquence d'impact dans cette zone (résultat obtenu à partir du modèle de chute de glace). Afin de calculer le risque global pour une personne qui se promène le long d'un tronçon de chemin à l'intérieur du parc, on a additionné le risque lié à chaque mètre carré le long de ce tronçon. Le Tableau 14 et le Tableau 15 présentent un récapitulatif des risques calculés pour chacun des tronçons.

Tableau 14: **Évaluation du risque** (sans aucune mesure de minimisation des risques) pour un piéton sur l'un des tronçons à risque, conformément à la section **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Tableau 3. Les zones hachurées ne sont pas pertinentes car il s'agit de chemins rarement utilisés.

Groupe de personnes	1 fois par an	1 fois par semaine	1 fois par jour
Tronçon	Chute de glace	Chute de glace	Chute de glace
A1			
A2			
A3			
A4			
A5			
B1			
B2			

Tableau 15: **Évaluation du risque** avec l'éolienne T07 dans une position parking définie pour un piéton sur l'un des tronçons à risque, conformément à la section **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Tableau 3. Les zones hachurées ne sont pas pertinentes car il s'agit de chemins rarement utilisés.

Groupe de personnes	1 fois par an	1 fois par semaine	1 fois par jour
Tronçon	Chute de glace	Chute de glace	Chute de glace
A1			
A2			
A3			
A4			
A5			
B1			
B2			

S'il est impossible de classer des tronçons dans une fourchette de risque acceptable au moyen de mesures d'information, il faut alors prévoir des mesures opérationnelles (chapitre 8).

## A Graphiques du risque de chute de glace pour tous les sites d'implantation d'éoliennes

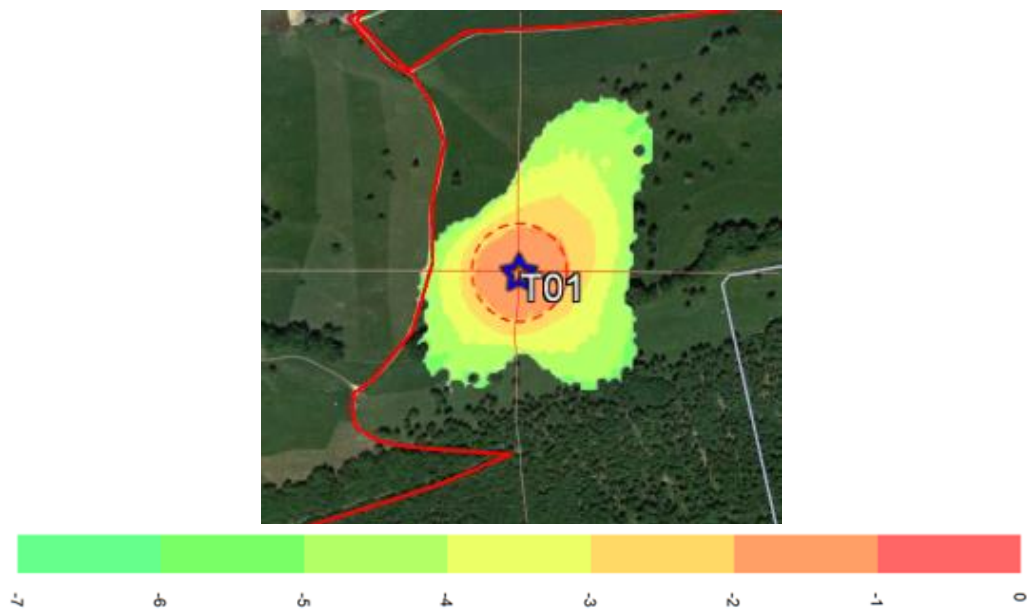


Figure 20: **Éolienne T01:** fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m). Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

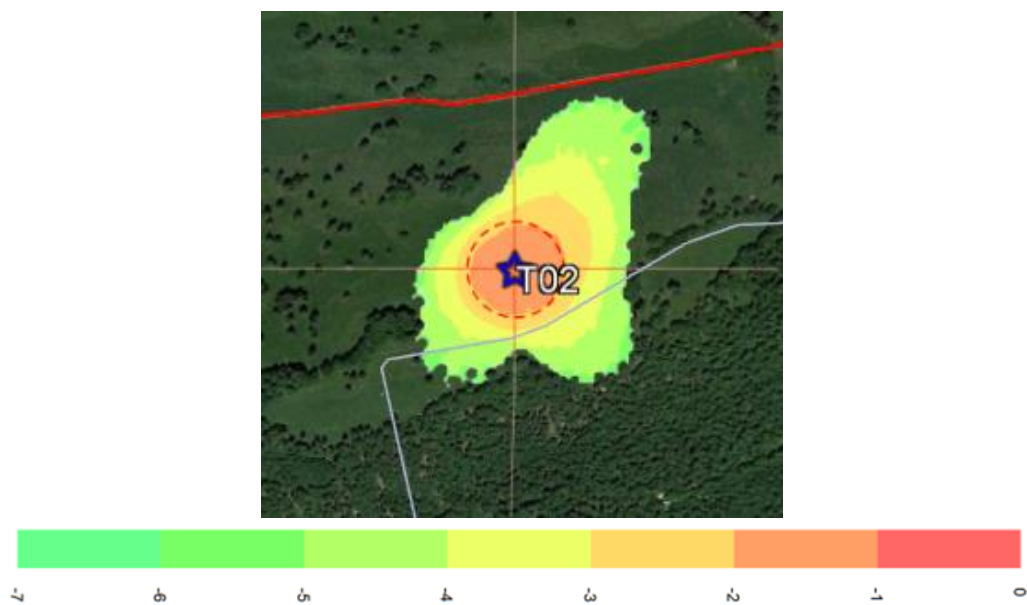


Figure 21: **Éolienne T02:** fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m). Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

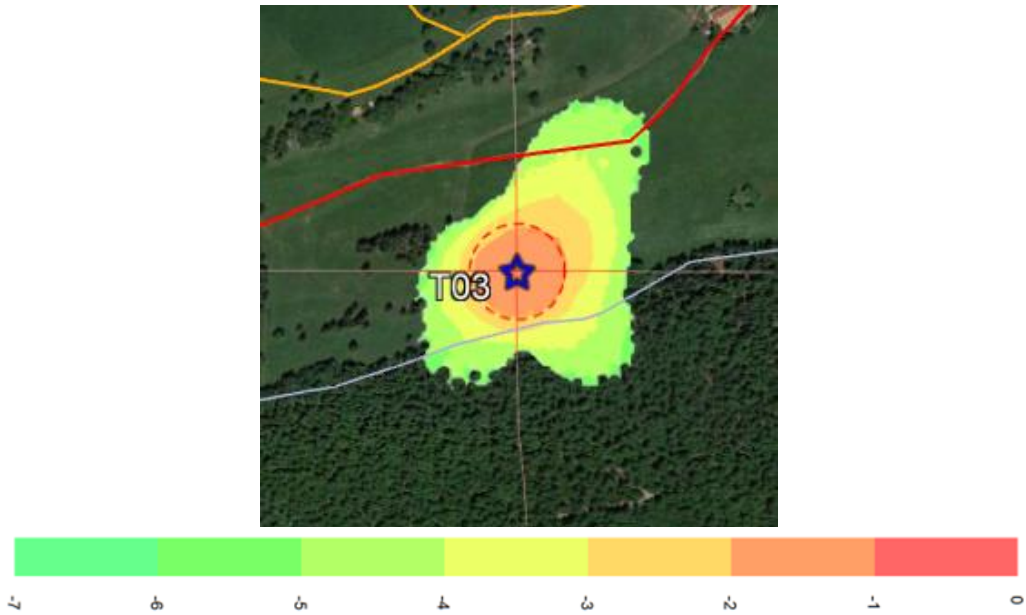


Figure 22: **Éolienne T03:** fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m). Le trait gris matérialise la frontière cantonale.

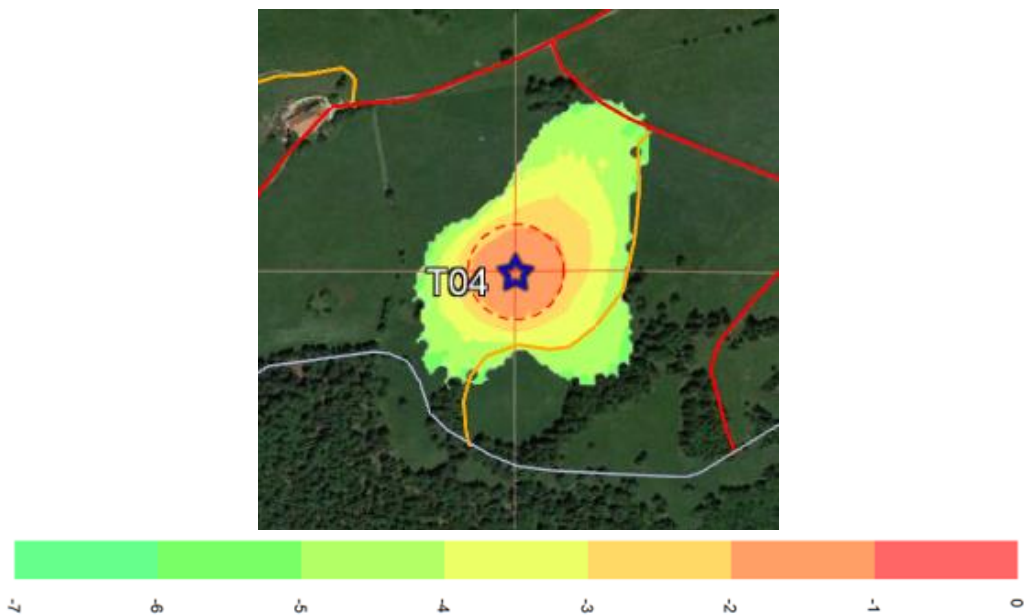


Figure 23: **Éolienne T04:** fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m). Le trait gris matérialise la frontière cantonale.



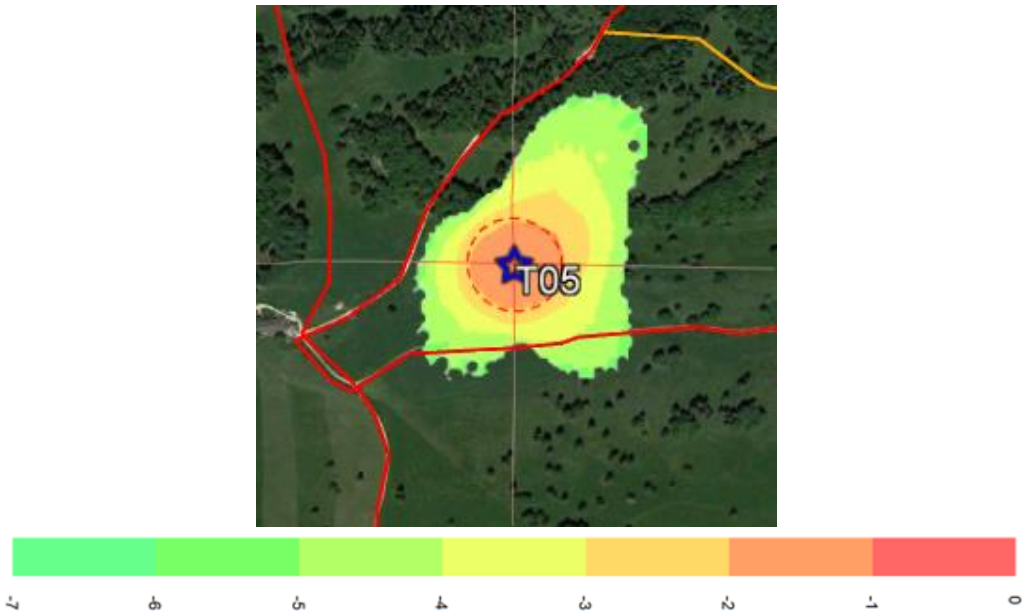


Figure 24: **Éolienne T05:** fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m).

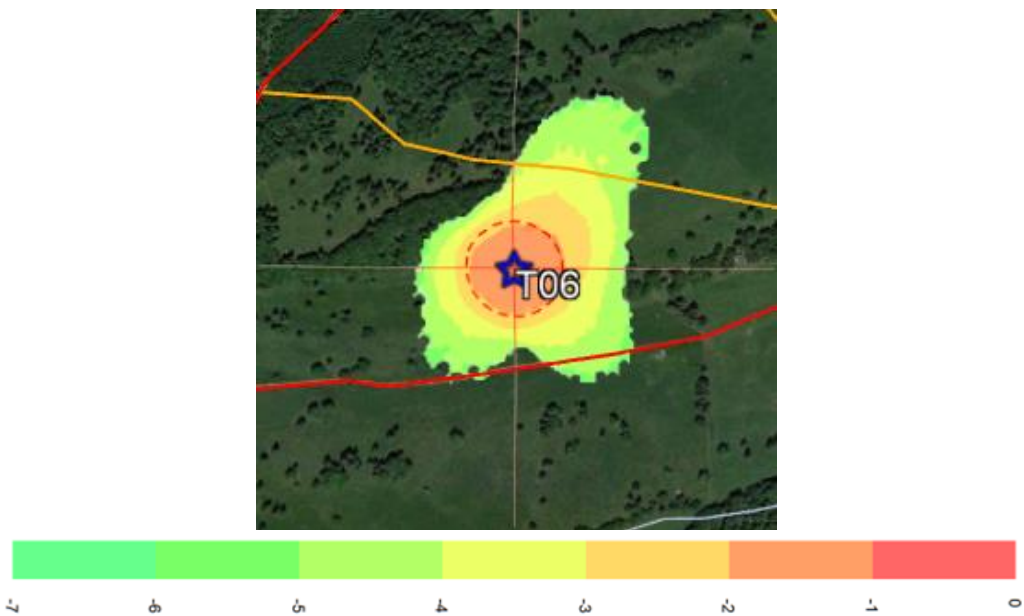


Figure 25: **Éolienne T06:** fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m).

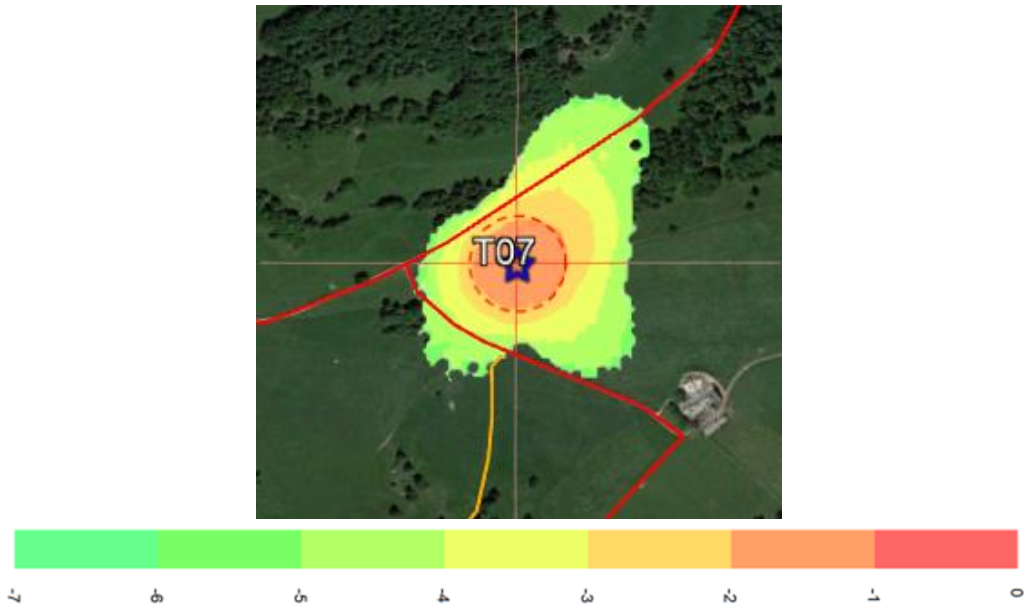


Figure 26: **Éolienne T07**: fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m).

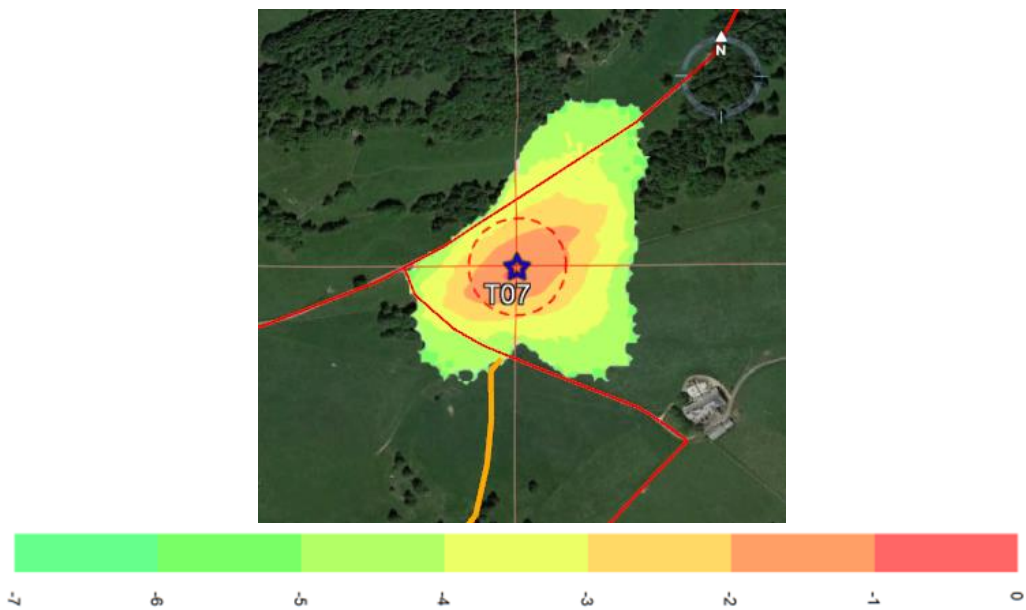


Figure 27: **Éolienne T07 (position parking)**: fréquences d'impact [impacts/m<sup>2</sup> et par an] pour la chute de morceaux de glace de plus de 100 g. Le cercle en pointillés rouges indique le diamètre du rotor. (Dimensions de la photo 680 m x 680 m).

## B Bibliographie

- [1] R. Cattin, M. Russi und G. Russi, «4 years of monitoring a wind turbine under icing conditions,» in *IWAIS XIII*, Andermatt, Schweiz, 2009.
- [2] S. Biswas, P. Taylor und J. Salmon, «A model of ice throw trajectories from wind turbines,» *Wind Energy*, p. 889–901, 2012.
- [3] Vestas Wind Systems A/S, «Spezifizierung von „Yaw into Fixed Position due to Ice“,» 2016.
- [4] R. Cattin, S. Koller und U. Heikkilä, «VEREISUNG ST. BRAIS UND MONT CROSIN,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2016.
- [5] S. C. Müller und S. Bourgeois, «Ice piece database thrown by wind turbines in Switzerland,» in *Windeurope 2017*, Amsterdam, 2017.
- [6] J. Lundén, K. Hultin, E. Aretorn und J. Sundström, «ICETHROWER – mapping and tool for risk analysis,» 2017.
- [7] R. Cattin, S. Kunz, A. Heimo, G. Russi, M. Russi und M. Tiefgraber, «WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS,» in *EWEC*, 2007.
- [8] R. Cattin, S. Kunz, A. Heimo, M. Russi und G. Russi, «Two Years of Monitoring of a Wind Turbine under Icing Conditions,» in *DEWEK*, 2008.
- [9] R. E. Bredesen und H. A. Refsum, «Methods for evaluating risk caused by ice throw and ice fall from wind turbines and other tall structures,» 2016.
- [10] M. Agatz, *Windenergie Handbuch*, 2015.
- [11] Vestas, «Allgemeine Beschreibung Eissturz- und Eisabwurfisiko - sowie Risikominderung - V105/V112/V117/V126/V136/V150,» 2017.
- [12] Meteotest, «Windenergieprojekt Montoz - Pré Richard: Eiswurfgutachten,» 2016.