

Rapport final, 17 novembre 2017

Analyse de risque concernant la glace se formant sur les éoliennes

Comparaison avec d'autres risques

Auteur

Dr. Jean-Marc Vaucher, swissi SA

**La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.**

Adresse

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie OFEN
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale : 3003 Berne
Infoline 0848 444 444, www.suisseenergie.ch/conseil
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.suisseenergie.ch



swissi

Analyse de risque concernant la glace se formant sur les éoliennes Comparaison avec d'autres risques



Entreprise	Office fédéral de l'énergie (OFEN)
-------------------	------------------------------------

Numéro de projet	5120013
-------------------------	---------

Objet	Eoliennes
--------------	-----------

Représentant de l'entreprise	Monsieur Markus Geissmann
-------------------------------------	---------------------------

Conseiller(s) de Swissi SA	Dr Jean-Marc Vaucher
-----------------------------------	----------------------

Lieu et date	Neuchâtel, le 17.11.2017/VA/kae/VA
---------------------	------------------------------------

Table des matières

1	Introduction	4
2	Développement des éoliennes et accidentologie	5
2.1	Développement des éoliennes en Suisse et dans le monde	5
2.2	Accidents impliquant des éoliennes	7
2.3	Etude des dangers du projet éolien du Mont-de-Trême [2.3.1]	8
2.3.1	Méthode d'analyse	9
2.4	Analyse de risque selon OPAM	11
3	Bases légales	12
3.1	Eoliennes en Suisse (rapport OFEN) [3.1.1]	12
3.2	Site de l'Office Fédéral de l'Energie [3.2.1]	12
4	Etudes de références	14
4.1	Vereisungskarte der Schweiz [4.1.1]	14
4.2	Wind turbine ice throw studies in the swiss alps [4.2.1]	15
4.3	Vereisung WEA St. Brais [4.3.1]	18
4.4	Développement de turbines pour l'environnement alpin [4.4.1]	19
5	Eoliennes : principes de base	21
5.1	Construction d'une éolienne	21
5.2	Régimes de vents propices au fonctionnement	22
6	Eoliennes : incidents et accidents	24
7	Accrétion de glace sur les éoliennes [7.1, 7.2]	25
7.1	Glaze	27
7.2	Wet snow	27
7.3	Rime	27
7.4	Hoar frost	27
8	Principe de l'analyse de risque diagramme nœud papillon	28
9	Descriptions des termes de l'arbre de défaillance	29
9.1	Terme type d'éolienne	29
9.2	Terme météorologie	30
9.3	Terme balistique	33
9.3.1	Description des forces en présences	34
9.3.2	Impacts, énergie, force	35
9.4	Terme emplacement de l'éolienne	38
9.5	Conséquences sur la zone impactée	38
9.5.1	Impact sur les personnes	39

9.5.2	Impact sur un véhicule	39
9.5.3	Aspects médicaux de l'impact d'éléments de glace	39
9.6	Autres impacts d'éléments de glace	41
9.6.1	Survol d'éoliennes par des avions ou hélicoptères	41
9.6.2	Impacts sur un casque	42
10	Descriptions des termes de conséquences	42
10.1	Terme cheminement pour véhicule	43
10.2	Terme cheminement pour piétons	43
10.3	Terme personne stationnaire	44
11	Application du diagramme nœud papillon aux éoliennes	45
11.1	Résultats d'impacts	46
11.1.1	Résultats d'impacts à Gütsch	47
11.1.2	Résultats d'impacts à St-Brais	49
11.1.3	Considérations concernant le total des impacts	50
11.2	Temps de présence d'une personne	52
11.3	Calcul probabiliste final	54
11.4	Exemple de calculs	55
11.4.1	Scénario personne statique	55
11.4.2	Scénario dynamique	56
11.4.3	Résumé des scénarios	57
11.4.4	Résumé des hypothèses	57
12	Comparaison avec d'autres risques	58
12.1	Statistiques du BPA	58
12.2	Statistiques de la SUVA	59
12.3	Autres statistiques	59
12.4	Utilisation de véhicule à moteur	59
12.5	Tabagisme en Suisse	59
12.6	Synthèse des statistiques	60
13	Discussion des résultats	61
13.1	Statistiques et analyse de risque	61
13.2	Modélisations Météotest	62
14	Conclusions	63
15	Abréviations	65
16	Bibliographie	67
Annexe 1 - Signalisation du danger de givrage des éoliennes		69

1 Introduction

Ce rapport a pour but d'analyser le risque lié au givrage des éoliennes et aux éléments de glace tombants ou projetés. Il s'agit aussi de quantifier le risque et de le comparer à d'autres risques courants de l'hiver ou de la vie de tous les jours tels que la grêle.

L'approche de ce rapport est autant rétrospective (accidentologie) que prospective (modélisation). Cette double approche est nécessaire pour confronter la réalité du terrain, des mesures de protection prises et, ainsi, de montrer la cohérence avec les modélisations. L'analyse de risque est corroborée par ces deux aspects.

Le risque lié à la glace sur les éoliennes est connu, mais l'augmentation de la taille des rotors et la hauteur des nacelles implique une augmentation de la distance de projection des morceaux de glace.

Si l'accidentologie des éoliennes est relativement bien développée pour les dégâts mécaniques et les suites d'incendies, il n'en est pas de même concernant les conséquences des projections de glace qui sont difficile à définir si une observation directe et continue n'est pas mise en place. A contrario, les blessures et les effets mortels sont connus.

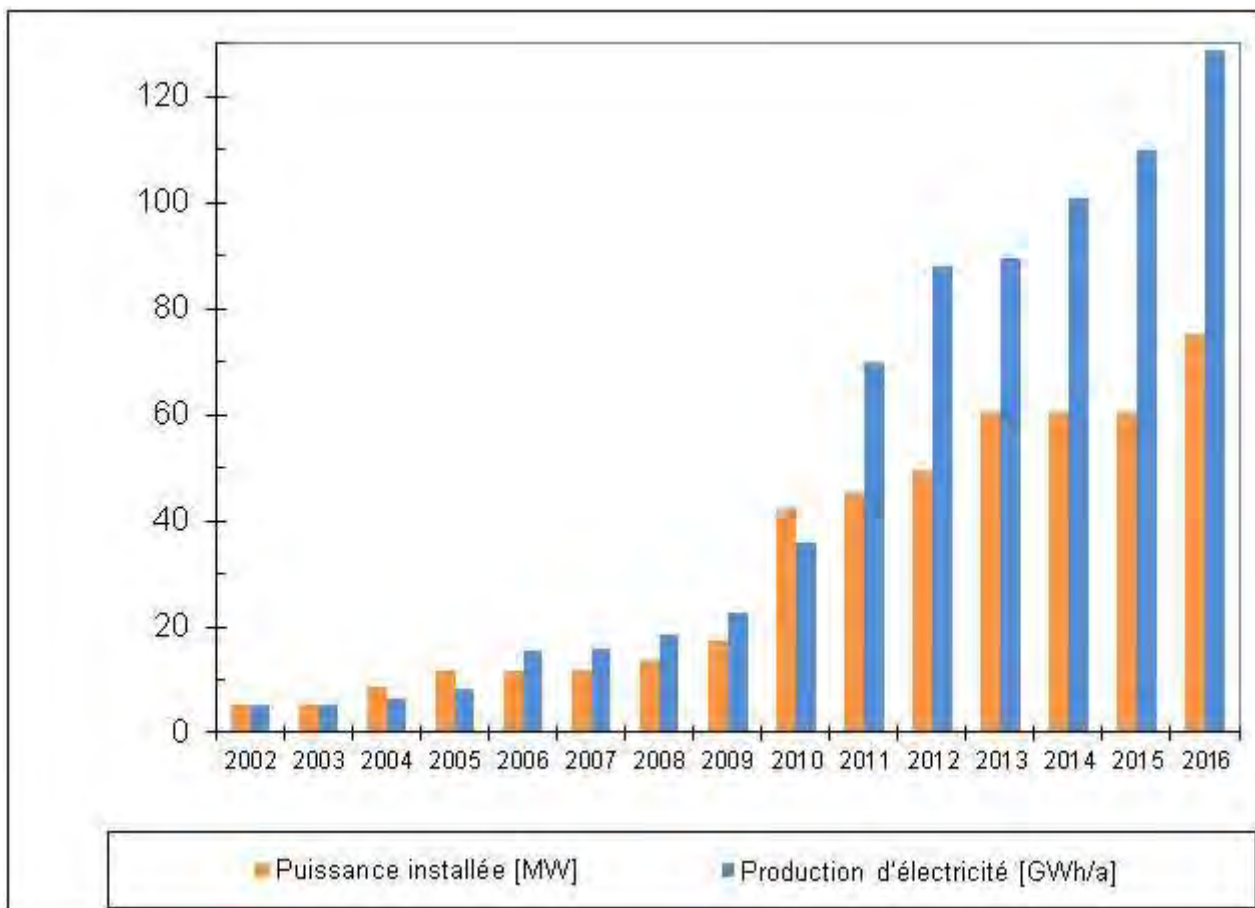
Le but de ce rapport était de mettre en évidence d'autres risques de glace tel que les chutes de toiture et leurs effets sur l'Homme et sur les biens matériels. Malheureusement, il n'existe pour ainsi dire aucune statistique dans ce domaine et les assureurs n'ont pas été en mesure de fournir de statistique dans ce domaine (à une exception près).

Il a donc fallu se rabattre sur des risques un peu plus éloignés de ce que nous souhaitions mettre en comparaison.

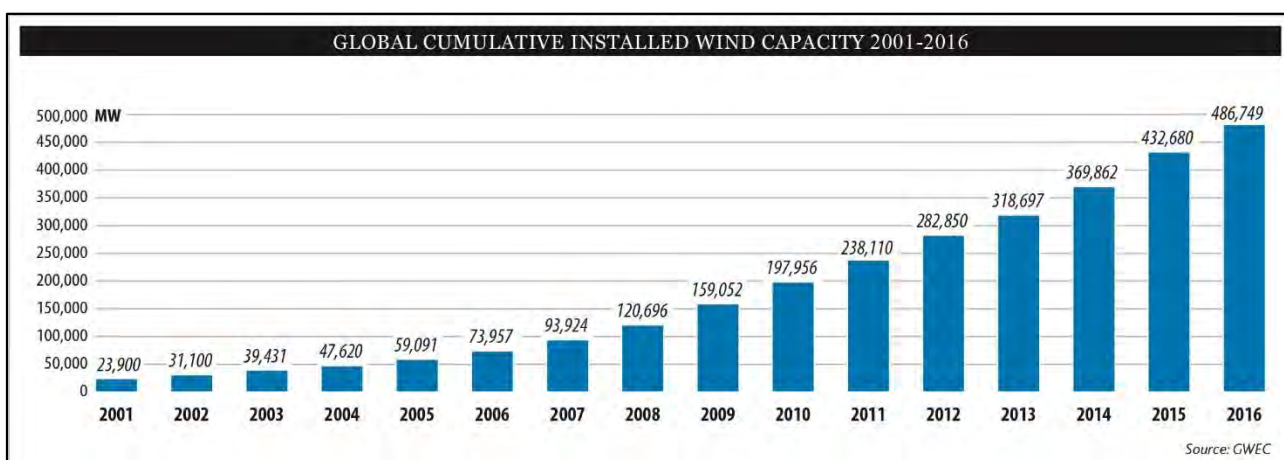
2 Développement des éoliennes et accidentologie

2.1 Développement des éoliennes en Suisse et dans le monde

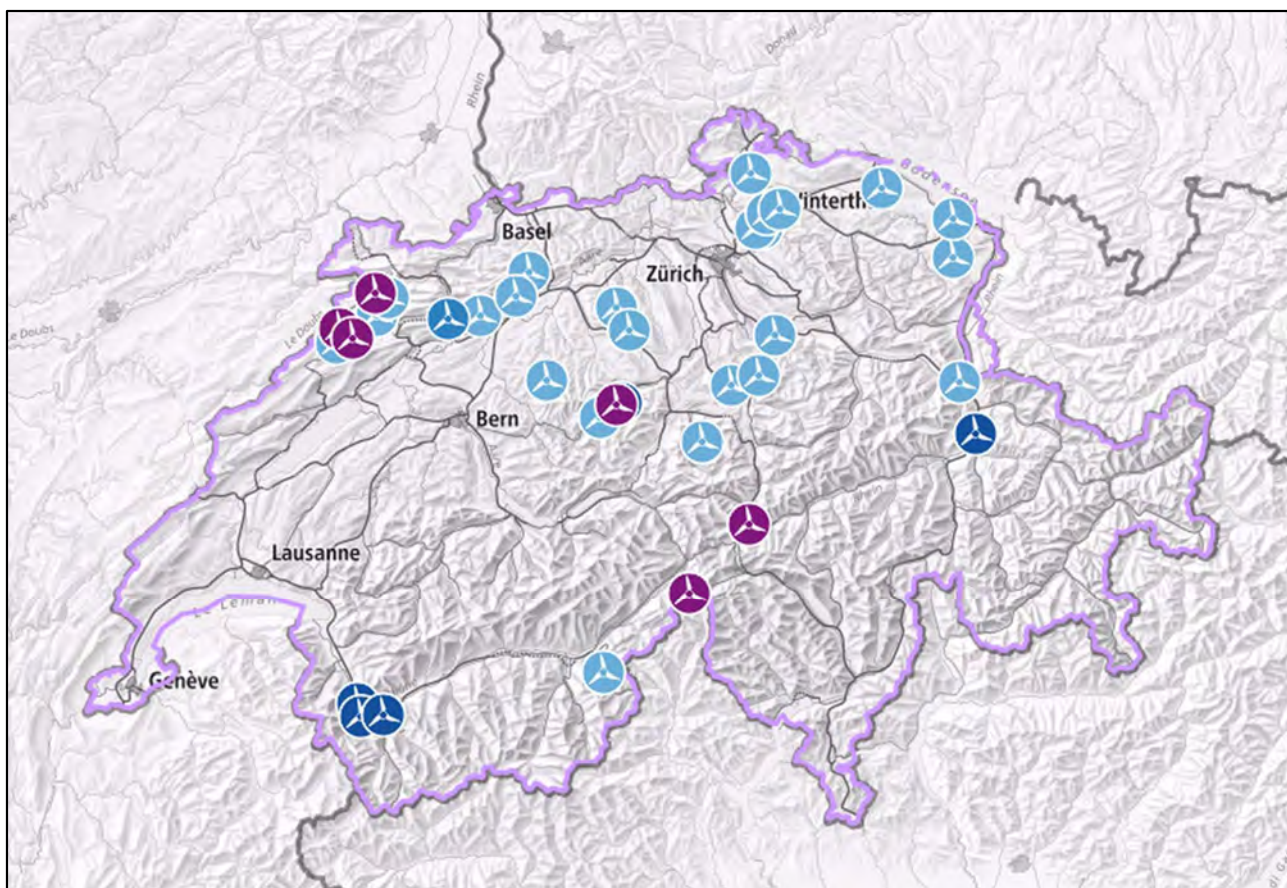
Le développement de l'énergie éolienne est en croissance tant en Suisse que par le monde. Cette croissance est illustrée dans les quatre graphiques suivants (source Suisse - Eole) :



Evolution de l'éolien en Suisse [2.1.1]



Evolution de l'éolien de par le monde [2.1.2]



Eoliennes en suisse (37 turbines) [2.1.1]



Eoliennes en service

Sites avec des éoliennes > 100 kW

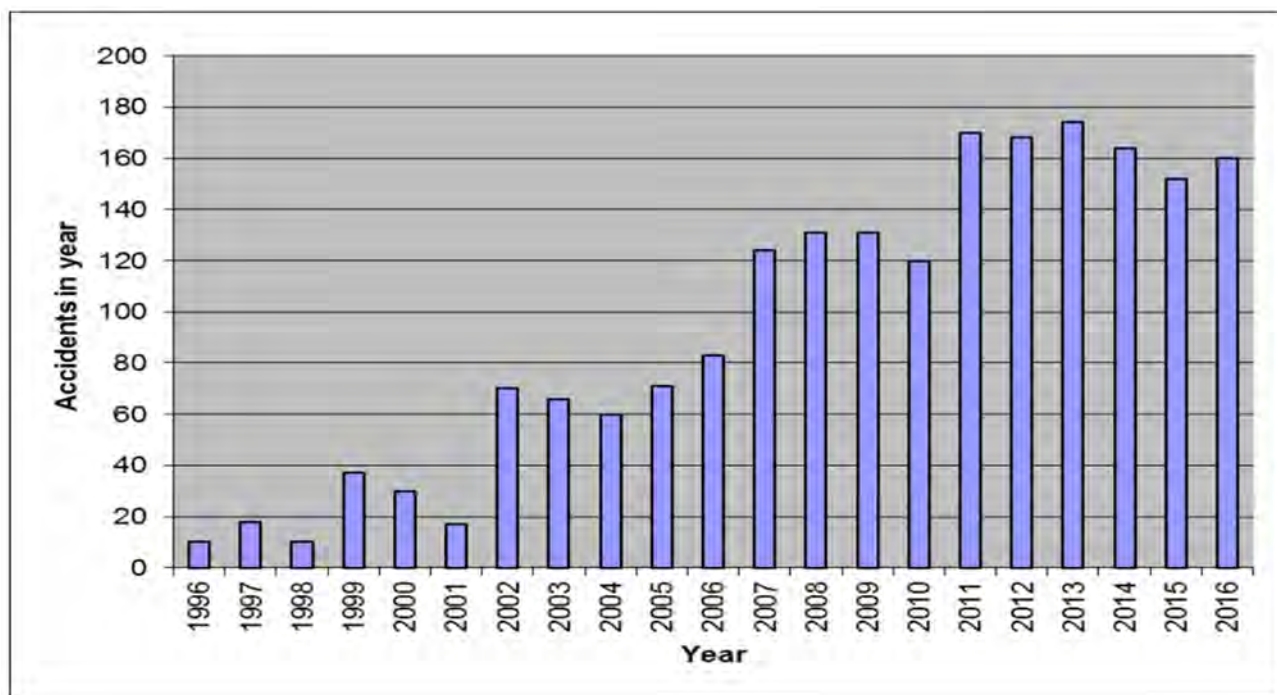
Sites	Nombre	Puissance totale	Mise en service
Mont-Crosin BE	16	37.2	09/2010, 11/2013, 09/2016 (anciennement 1996, 1998, 2001 & 2004)
Le Peuchapatte JU	3	6.9	12/2010
Entlebuch LU	3	4.15	10/2005, 2011, 09/2013
Saint-Brais JU	2	4.0	11/2009
Gütsch-Andermatt UR	4	3.3	(2002) 2004, 10/2010, 11/2012
Haldenstein GR	1	3	06/2013
Charrat VS	1	3	09/2012
Griespass-Nufenen VS	4	9.2	09/2011, 10/2016
Vernayaz-Martigny VS	1	2.0	05/2008
Collonges VS	1	2.0	12/2005
Grenchenberg SO	1	0.15	1994
Total	37	74.9	

On compte en outre 5 éoliennes d'une puissance de 10 à 100 kW et 14 de moins de 10 kW, totalisant 0,32 MW.

Détail de éoliennes installées au 08.11.2016 [2.1.1]

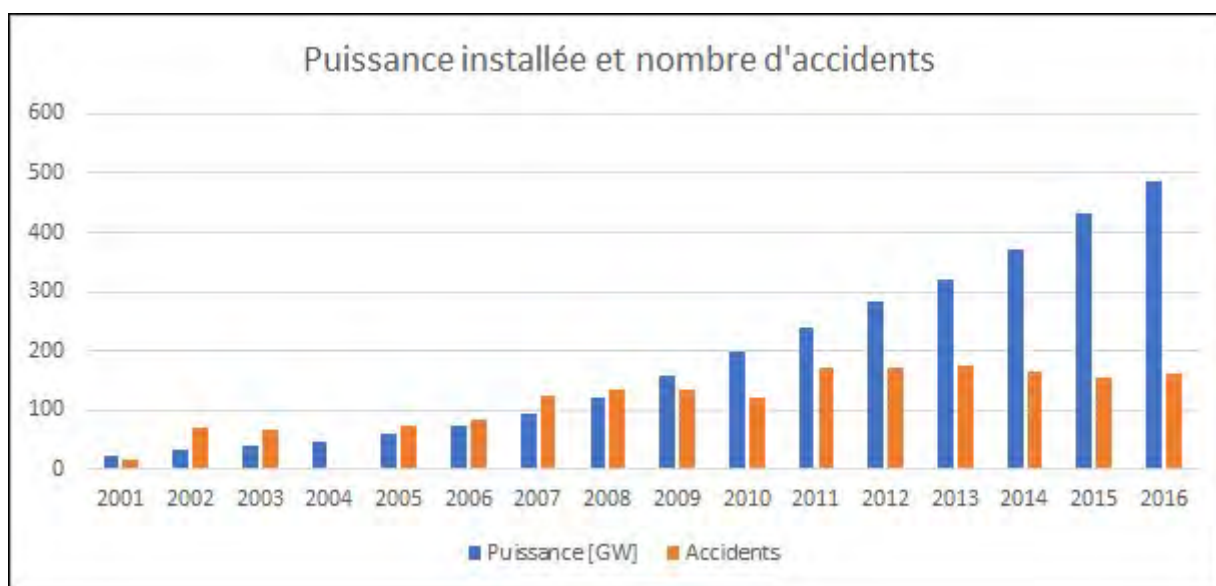
2.2 Accidents impliquant des éoliennes

Si l'évolution de la puissance installée mondiale est quasiment exponentielle, le nombre d'incidents et d'accidents de tous genres affectants les éoliennes n'évolue, quant à lui, pas de la même manière. Depuis 2011, une certaine stabilité est visible. Le graphique suivant montre les cas d'accidents répertoriés de 1996 à 2016 (source : CWIF).



Accidents et incidents totaux impliquant des éoliennes [2.2.1]

Le graphique synthétise l'évolution de la puissance installée et le nombre d'accidents répertoriés.

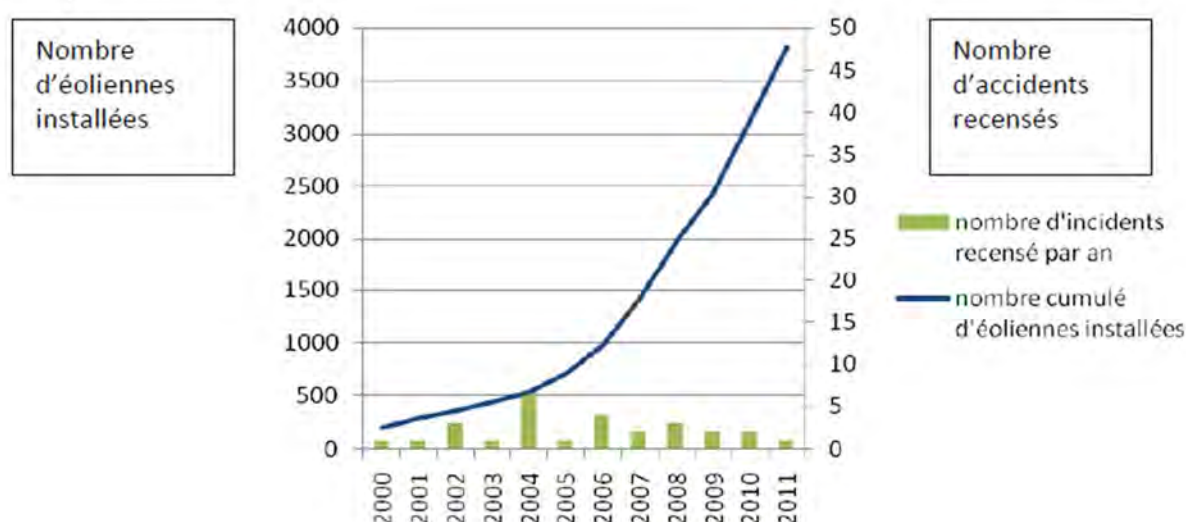


Synthèse des graphiques précédents : puissance mondiale installée vs accidents/incidents

Bien que les statistiques répertorient plus de 1100 projections de glace, le nombre d'accidents, avec conséquences pour l'Homme (2 blessés et 1 mort directement impactés par de la glace), impliquant des chutes ou projections de glace est trop faible à ce jour pour pouvoir tirer une statistique spécifique.

2.3 Etude des dangers du projet éolien du Mont-de-Trême [2.3.1]

L'étude de danger du projet éolien du Mont-de-Trême présente la courbe française de la puissance installée et des accidents/incidents. On peut remarquer le même phénomène exponentiel de développement de la puissance et une stabilisation, voire diminution, des accidents/incidents.



Nombre d'éoliennes recensées versus nombre d'accidents en France [2.3.1]

Ceci démontre la cohérence statistique entre le niveau mondial et l'expérience française. Au-delà de ce problème, l'étude des dangers du projet Mont-de-Trême mentionne un certain nombre de mesures de protection pour maîtriser le risque d'accident en général, y.c. en cas de givrage.

- Prévenir la mise en mouvement de l'éolienne lors de la formation de glace
- Prévenir l'atteinte des personnes par la chute de glace
- Prévenir l'échauffement significatif des pièces mécaniques
- Prévenir la survitesse
- Prévenir les courts-circuits
- Prévenir les effets de la foudre
- Prévenir et intervenir en cas d'incendies
- Prévenir les défauts de stabilité de l'éolienne et les défauts d'assemblage
- Prévenir les erreurs de maintenance
- Prévenir les risques de dégradation de l'éolienne en cas de vent fort

Ce même document étudie les dangers et risques sous plusieurs aspects et propose finalement une matrice de risque avec des probabilités annuelles chiffrées.

2.3.1 Méthode d'analyse

Ce document prend en compte les paramètres suivants :

- cinétique
- intensité
- gravité
- probabilité

Paramètre cinétique

La cinétique étant rapide pour l'ensemble des scénarios, il n'y a pas de gradation pour ce paramètre.

Paramètre intensité

L'intensité est définie selon un seuil d'effet toxique, de surpression, thermique ou lié à l'impact d'un projectile, pour les hommes et les structures. Elle dépend du degré d'exposition, lui-même 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.

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

T-2.3.1.1 Intensité et degré d'exposition [2.3.1]

La zone d'effet est définie pour chaque événement accidentel comme la surface exposée à cet événement.

La gravité est définie en fonction du nombre de personnes pouvant être atteint par le phénomène dangereux dans chacune des zones d'effet définies.

Dans cette étude, 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

Il faut relever que l'arrêté français du 29 septembre 2005 impose une évaluation des probabilités de départ uniquement (l'événement se produit) et ne tient pas compte des probabilités que l'événement produise un accident.

Le tableau suivant présente les niveaux de probabilité selon les définitions mentionnées précédemment.

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

T-2.3.1.2 Définition de probabilité [2.3.1]

Concernant la chute de glace (lorsque l'éolienne est à l'arrêt), de façon conservatrice, il est considéré que la probabilité est de classe « A ».

Concernant la projection de morceaux de glace, compte tenu de la difficulté à établir un retour d'expérience précis sur cet événement, considérant que l'arrêt du 26 août 2011 précise les mesures de prévention de projection de glace et constatant qu'aucun accident lié à une projection de glace n'a été recensé, une probabilité « B » est proposée pour cet événement. La matrice suit dans le tableau suivant.

Conséquence	Classe de Probabilité				
	E	D	C	B	A
Désastreux					
Catastrophique					
Important					
Sérieux		Effondrement Projection de pale			
Modéré			Chute élément éolienne	Projection de glace	Chute de glace

T-2.3.1.3 Matrice de risques [2.3.1], vert et jaune = acceptable, rouge = inacceptable

Finalement, le rapport conclu que le risque est acceptable, y.c. pour le chute de glace, en prenant une mesure de signalisation du danger.

Cette étude doit être mise en corrélation avec l'analyse de type risque OPAM qui a été choisie comme base de travail pour notre propre étude.

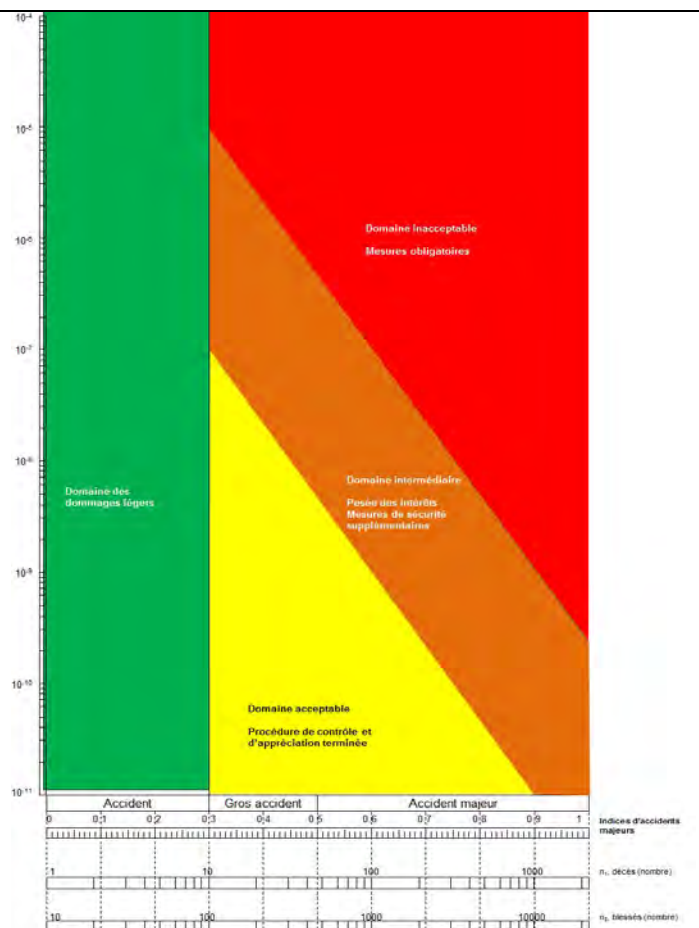
2.4 Analyse de risque selon OPAM

L'OPAM, ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs [2.4.1] aborde aussi le risque par rapport à la probabilité de l'événement. Si la probabilité de l'événement est suffisamment faible, par rapport aux conséquences, le rapport succinct sans analyse de risque détaillée suffit. A contrario, si la probabilité de l'événement est telle que les conséquences sont à priori inacceptable, alors une analyse de risque détaillée est exigée et le paramètre de probabilité des conséquences est introduit.

Qui plus est, une courbe cumulative est établie pour la somme des événements redouté. Il convient toutefois de relever que seul les accidents majeurs sont pris en compte.

La matrice ci-contre [2.4.1] montre les zones de dommages légers (vert), acceptable sans justification (jaune), acceptable avec justification (orange) et inacceptable (rouge).

Par rapport à l'étude du Mont-de-Trême, l'échelle est différente et ne peut directement être corrélée.



La différence fondamentale entre les matrices de risques OPAM et celle du Mont-de-Trême est que l'OPAM concerne uniquement les atteintes au public, l'OPAM ne prend pas en compte les effets sur le personnel de l'entreprise.

Il conviendra, dans la conclusion de ce rapport, de mettre en regard les différentes approches afin de garder une réponse proportionnée au risque.

3 Bases légales

Bien que ne s'appliquant que pour les matières dangereuses, le principe de l'analyse de risque est basé par analogie à l'ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM) [2.4.1]. Notamment, il s'agit d'établir une matrice probabilités - conséquences pour l'Homme. Cette approche permet de se raccrocher à l'acceptation de conséquences pour l'Être Humain dues à l'activité industrielle humaine. Ainsi, les éoliennes sont installations destinées à desservir la collectivité, elles ne doivent pas produire plus de nuisances et de risques que d'autres installations de service ou des prestations à buts collectifs, comme par exemple les acheminements d'électricité ou les transports de marchandises dangereuses.

3.1 Eoliennes en Suisse (rapport OFEN) [3.1.1]

Ce rapport de juin 2008 constitue la base de travail pour la planification de l'aménagement du territoire. Il tient compte non seulement de l'aménagement du territoire, mais aussi de l'impact des éoliennes sur l'environnement, le sol, la végétation, la faune, la société et l'économie.

Parmi ces effets, ce sont les effets sur la société qui nous intéressent. Le chapitre 5 du rapport cité en titre de paragraphe fait référence aux effets suivants :

- image de paysage
- bruit
- projection d'ombres, réflexion

Aucune mention n'est faite concernant les risques de glace. Ceci probablement par le fait que les statistiques ne présentent qu'un seul décès dû au phénomène glace et peu d'impact par les autres cas.

3.2 Site de l'Office Fédéral de l'Energie [3.2.1]

Le site de l'OFEN présente les études, les recommandations et les exigences quant à l'installation des éoliennes. Notamment, le « Guide pour l'optimisation des pratiques de planification des parcs éoliens » du 31 mars 2016 [3.2.2] est un document important et le tableau suivant fait état des intérêts pris en considération.

Intérêts	Canton de Neuchâtel			Canton du Valais				Canton de Fribourg			Canton de Vaud			Canton du Jura		
	EB	PDir	PAFF I/II	EB	PDir	PAFF Charrat	PAFF Collonges	EB	PDir	PAFF	EB	PDir	PAFF	EB	PDir	PAFF (projet)
Production énergétique	O	O	O/O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Nature	O	O	O/O	N	N	o	o	O	o	o	N	O	O	O	O	O
Avifaune	O	o	O/O	N	N	o	o	O	o	o	N	O	O	np	np	O
Chiroptère	O	o	O/O	N	N	o	o	O	o	o	N	O	o	np	np	O
Intégration paysagère	O	O	O/O	N	N	o	o	O	o	O	o	O	O	O	O	O
Forêt	O	O	np / O	N	N	np	np	O	o	O	N	O	O	O	O	O
Patrimoine bâti	O	O	O/O	N	N	o	o	O	o	O	o	O	O	O	O	O
Eaux souterraines	O	O	O/O	N	N	o	o	O	o	O	N	O	O	O	O	O
Bruit	O	O	O/O	N	N	o	O	O	o	O	o	O	O	O	O	O
Faisceaux hertziens	O	O	O/O	N	N	o	N	O	o	O	N	N	O	O	O	O
Aviation civile	O	O	O/O	N	N	o	o	O	o	O	N	O	O	O	O	O
Aviation militaire	np	np	np	np	np	np	np	np	np	O	N	O	np	np	np	O
Météorologie	np	np	np	np	np	np	np	O	o	np	np	O	?	O	O	O
Ombres clignotantes	N	N	O/O	N	N	o	o	N	N	O	N	N	?	N	N	O
Projection de glace	N	N	O/O	N	N	N	N	N	N	O	N	N	O	N	N	O

Prise en compte de l'impact des éoliennes dans différents cantons à différentes phases des projets [3.2.2]

Par ailleurs, une gradation est également retenue :

- intérêts entièrement pris en considération = O
- intérêts succinctement ou partiellement pris en considération = o
- intérêts non pertinents dans le cas d'espèce ou à l'époque de l'examen = np
- intérêts omis = N
- information manquante = ?

Planification directrice = PDir

Plan d'affectation = PAFF

Études de base = EB

Il est à relever que le problème de projection de glace est pris régulièrement en compte dans le plan d'affectation (PAFF). Par contre, le document ne définit pas les mesures prises ou les restrictions imposées.

Dans l'OPAM, il est tenu en compte l'impact de l'entreprise soumise sur les développements futurs de la zone concernée, mais aussi de l'influence de l'arrivée d'autres entreprises soumises OPAM sur l'existant (effet domino). Dans le domaine de l'éolien, l'effet domino n'est en principe pas relevant car elles sont suffisamment éloignées des affectations pouvant être affectées par des éléments projetés à grande vitesse.

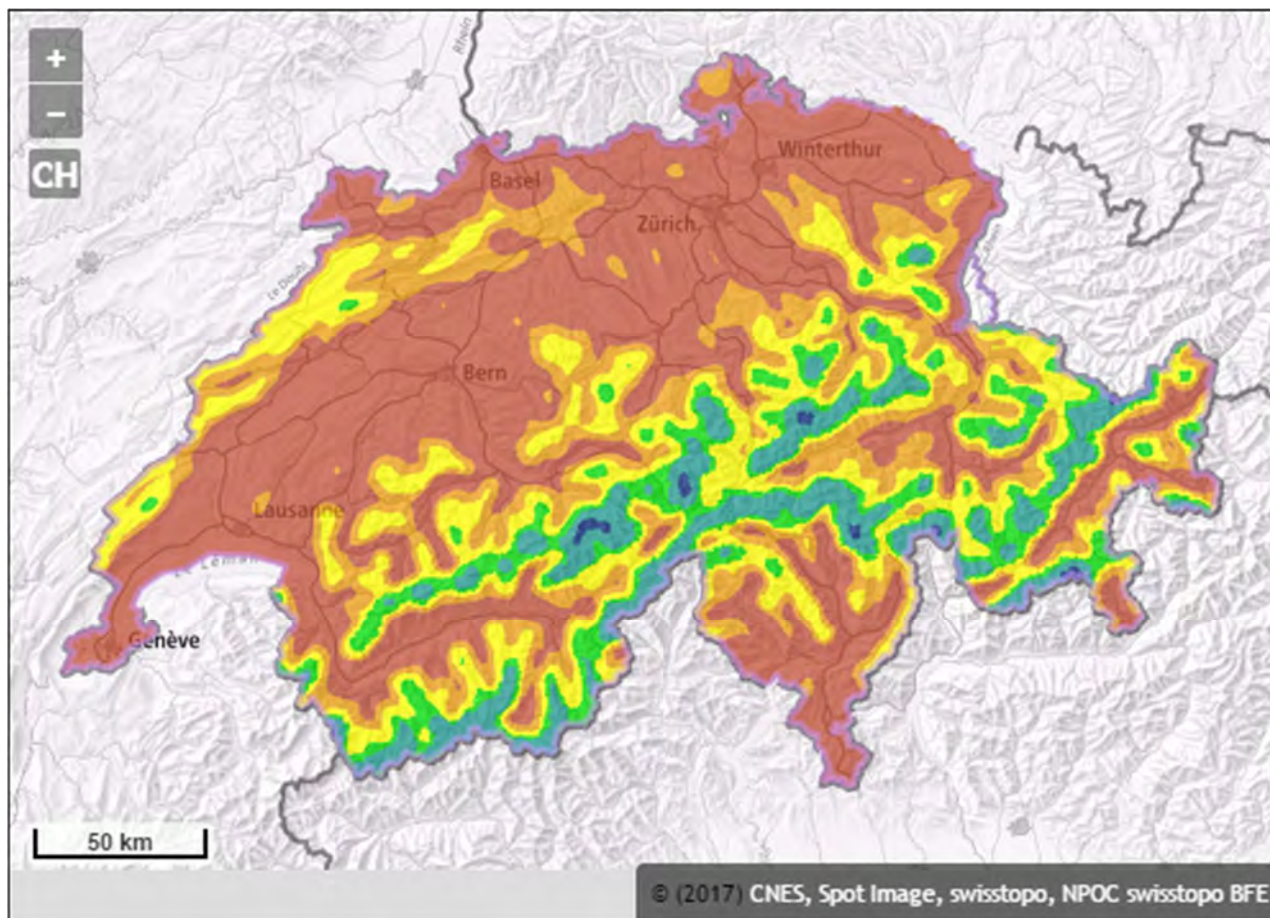
De par les contraintes de fonctionnement, les éoliennes sont éloignées les unes des autres par une distance égale à au moins 3 diamètres. Dans ces conditions, les éoliennes ne peuvent pas subir d'effets domino (transmission d'incendie de l'une à l'autre, dégâts de pales projetées, ...).

4 Etudes de références

4.1 Vereisungskarte der Schweiz [4.1.1]

Ce document de l'OFEN daté du 31 mai 2010 est une étude détaillée concernant le givrage des éoliennes en suisse.

Cette étude donne notamment une référence sur la probabilité annuelle des périodes de givre en Suisse [4.1.2].



Probabilité de givre annuelle [4.1.2]

Du point de vue de l'OPAM, le principe est de toujours prendre le critère majorant pour déterminant. Ainsi, la probabilité annuelle d'être en condition propice est :

Rouge/orange :	10/365, soit 2.74E-02
Jaune/vert :	30/365, soit 8.22E-02
Bleu clair/foncé :	60/365, soit 1.64E-01

Fréquence de givrage
en jours/année



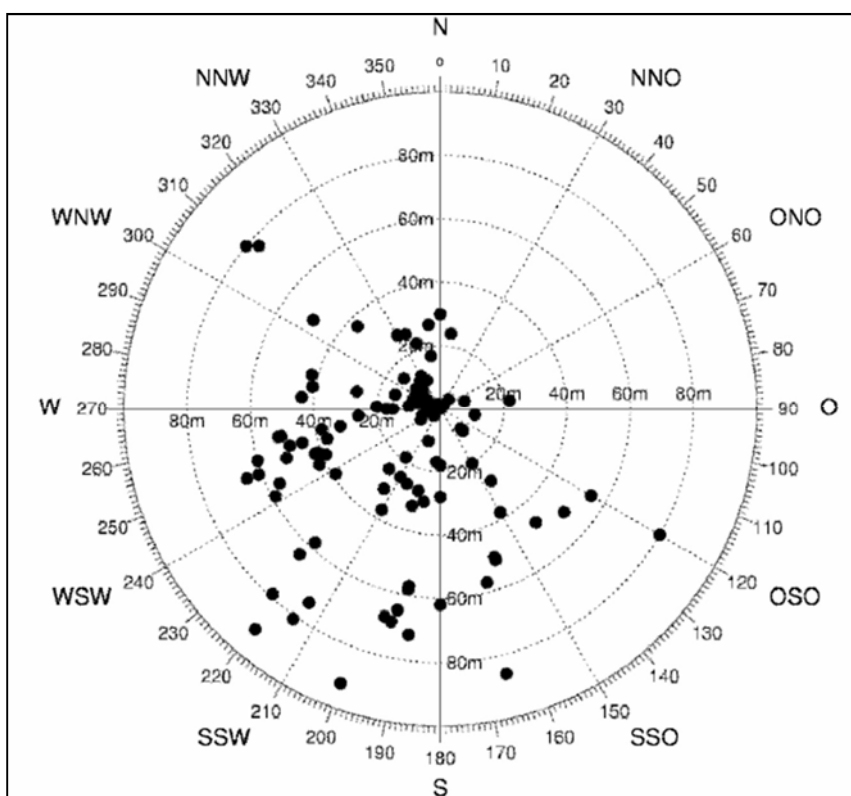
Ces valeurs ne sont qu'un indice parmi d'autres paramètres.

4.2 Wind turbine ice throw studies in the swiss alps [4.2.1]

Ce document est basé sur l'étude du site de la montagne de Gütsch en Suisse centrale. Ce site présentant l'avantage d'une station météorologique de SwissMetNet à environ 200 m de l'installation. L'étude décrit les méthodes d'analyse des fragments, la répartition en fonction de la masse et des distances.

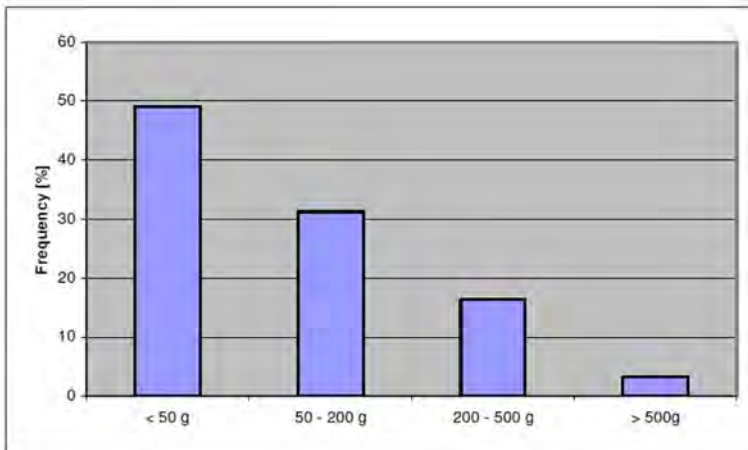
L'éolienne utilisée sur le site est de type Enercon E40 de 600 kW avec des pales chauffantes. Le rotor présente un diamètre de 40 m et une nacelle à 50 m de hauteur. La présence de pales chauffantes limite la formation de glace et facilite la chute ou l'éjection de la glace avant d'atteindre une taille trop importante.

Le graphique suivant montre la répartition réelle des fragments de glace en fonction de la distance.

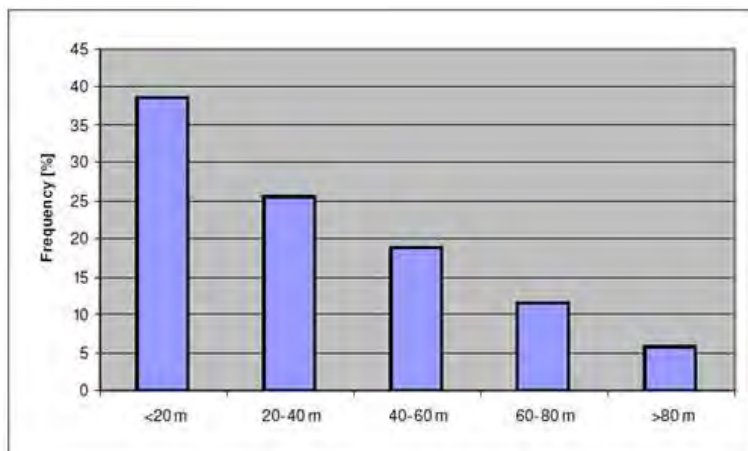


Répartition spatiale des éléments de glace projetés [4.2.1]

Les graphiques suivants sont particulièrement intéressants car ils présentent la répartition massique des fragments et la répartition par distances.



Répartition en % en fonction de la taille [4.2.1]



Fréquence en % en fonction de la distance [4.2.1]

Deux équations empiriques simplifiées relient la distance maximale de projection en fonction de la hauteur de nacelle et du diamètre de rotor.

Equation empirique, rotor en opération [4.2.2]

$$d_r = (D + H) * 1.5$$

d_r = distance de projection [m]

D = diamètre du rotor [m]

H = hauteur de nacelle en [m]

Remarque : la vitesse du vent n'est pas prise en considération.

Equation empirique, rotor arrêté [4.2.2]

$$d_s = v * (D/2+H)/15$$

d_s = distance de projection [m]

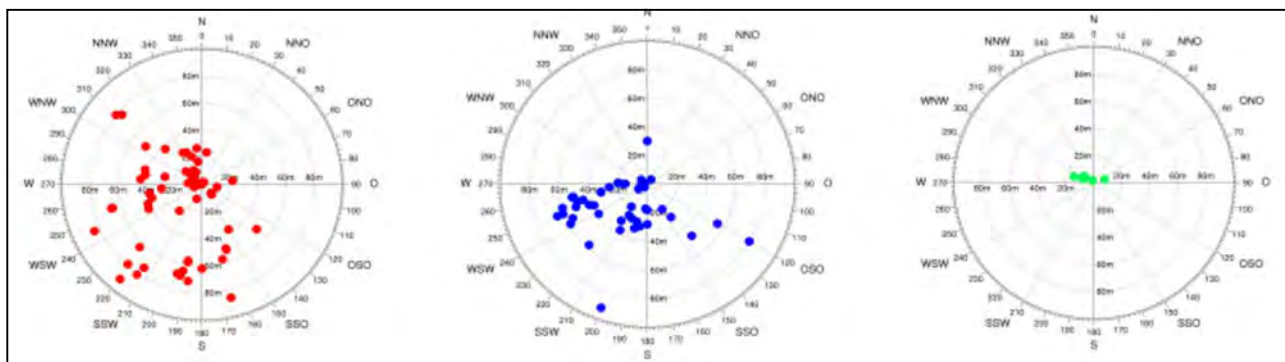
v = vitesse du vent au niveau de la nacelle

D = diamètre du rotor [m]

H = hauteur de nacelle en [m]

Cette analyse empirique n'est actuellement plus utilisée car elle est trop simpliste. Elle a fait place aux modélisations qui sont beaucoup plus proches de la réalité.

Finalement, le dernier graphique présente la répartition spatiale en fonction du type de glace.



Répartition spatiale des éléments de glace [4.2.1] (Rouge : clear ice - Bleu : rime ice - Vert : wet snow)

Cette étude permet de mieux cerner le type de fragments que l'on retrouve à plus ou moins longue distance de l'éolienne.

Il faut toutefois relever que les études ne prennent généralement pas en compte les types de glaces, mais uniquement le poids des fragments et les distances de projection. Ceci est encore une simplification qui va dans le sens de l'OPAM qui prend toujours en compte le scénario le plus péjorant. Ainsi

Cette étude a été réalisée sur les hivers 2005/6 et 2006/7, elle ne constitue pas une base suffisante pour la suite de notre rapport. Ce dernier se basant sur de la modélisation avec un modèle des plus récents et adapté spécifiquement à la turbine concernée.

4.3 Vereisung WEA St. Brais [4.3.1]

Le rapport confidentiel établi en 2013 couvre une étude du givrage des éoliennes de St-Brais de 2009 à 2013.



Localisation des machines de St-Brais [2.1]

Ce rapport étudie les impacts pendant les périodes de givre dans différentes conditions. Notamment, il est pris en compte la possibilité de chauffer les pales et la répartition spatiale en fonction de la masse des éléments de glace.

Le premier test prend en compte l'enclenchement du chauffage des pales après détection des conditions de givrage et ce pour une durée de 3h.

Le second test quant à lui prend en compte l'enclenchement préventif du chauffage des pales en fonction des conditions température/humidité puis, après détection des conditions de givrage, maintien de la température pour une durée de 3h.

Les résultats mettent en évidence une diminution supérieure de la masse des éléments de glace, ainsi qu'une distance de projection moindre, pour le second cas relevant de l'enclenchement préventif du chauffage des pales.

Les études d'impacts de glace et les voies d'amélioration sont toujours en cours à St-Brais. Il faut souligner que 2013 a été une année extrêmement propice aux phénomènes de givrages.

Il est à relever que les conditions qu'il faudra prendre en compte sont au nombre de trois :

- 1) Eolienne sans dispositif de chauffage
- 2) Eolienne avec dispositif de chauffage utilisé « curativement » (standstill)
- 3) Eolienne avec dispositif de chauffage utilisé « préventivement » (preventive)

Ces trois conditions sont rencontrées sur les éoliennes en Suisse.

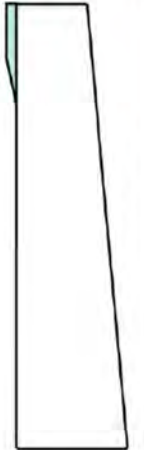
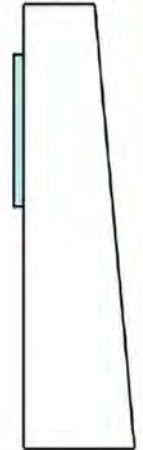
4.4 Développement de turbines pour l'environnement alpin [4.4.1]

Cette étude met en évidence les problèmes d'accrétion de glace du point de vue impact sur le rendement énergétique de l'éolienne. Cette étude permet toutefois de comprendre certains phénomènes et d'en tirer des informations sur les risques de projections et de chute d'éléments de glace.

Au travers de données expérimentales, statistiques et prévisionnelles, l'étude montre trois objectifs distincts :

- 1) Evaluer les effets du givrage sur les performances d'une éolienne à grande échelle sous conditions potentielles de givre.
- 2) Comprendre et quantifier les effets de la formation de glace sur les pales de l'éolienne, à l'aide du modèle de turbine du laboratoire d'essai installation et améliorer la mesure de performances.
- 3) Modélisation (LEWICE) 3D du champ d'écoulement autour des aubes de turbine en rotation.

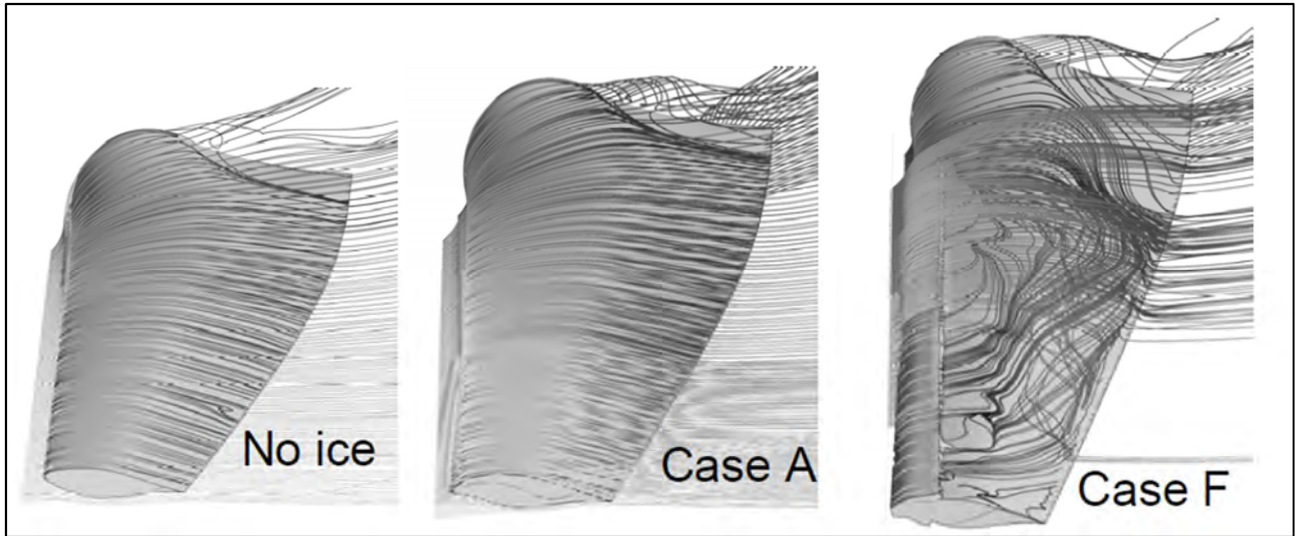
L'étude montre que la glace peut modifier le profil des pales de plusieurs manières, ce qui influe sur le comportement même de l'éolienne.

Test case	A	B	C	D	E	F
Profile shape						
Span-wise distribution	100 % 	25 % 	5 % 	Sawtooth 1 10% 	Sawtooth 2 5 - 20% 	100% 

Différents types d'accrétion sur les pales [4.3.1]

Cette modification de profil peut engendrer des turbulences, voire des vibrations, et favoriser, ensuite, le détachement des éléments de glace. Les cas D et E, accrétion en dents de scie, résultent de l'éjection partielle de la glace.

Il est intéressant de voir que la situation peut se modifier en permanence et que la probabilité de projection varie dans le temps. Cette situation rend d'autant plus complexe les prévisions.



Turbulences autour des pales en fonction du type d'accrétion [4.3.1]

5 Eoliennes : principes de base

5.1 Construction d'une éolienne

Les éoliennes sont des installations de production d'énergie renouvelable. Il existe plusieurs types d'éoliennes avec des positions d'axe différentes et des constructions différentes.

Seules nous intéressent, dans ce rapport, les éoliennes classiques à axe horizontal.

Le schéma ci-contre (S-5.1.1) décrit les organes principaux d'une éolienne. On y remarque particulièrement que les notions principales à retenir concernant l'éolienne sont :

- la hauteur
- la rotation des pales

Ainsi, le risque de projection de glace combine des grandeurs physiques telles que la gravité, la vitesse du vent et l'accélération centrifuge.

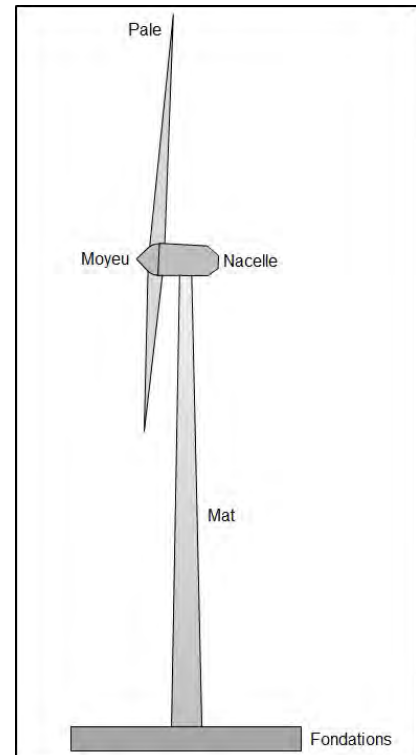
Le système de pales transmet l'énergie de rotation provoquée par le vent à l'intérieur de la nacelle où se trouvent les organes électromécaniques de production de l'électricité.

A mesure des années, la puissance des éoliennes augmente et, de facto, la dimension du mat, des pales et la vitesse en bout de pales.

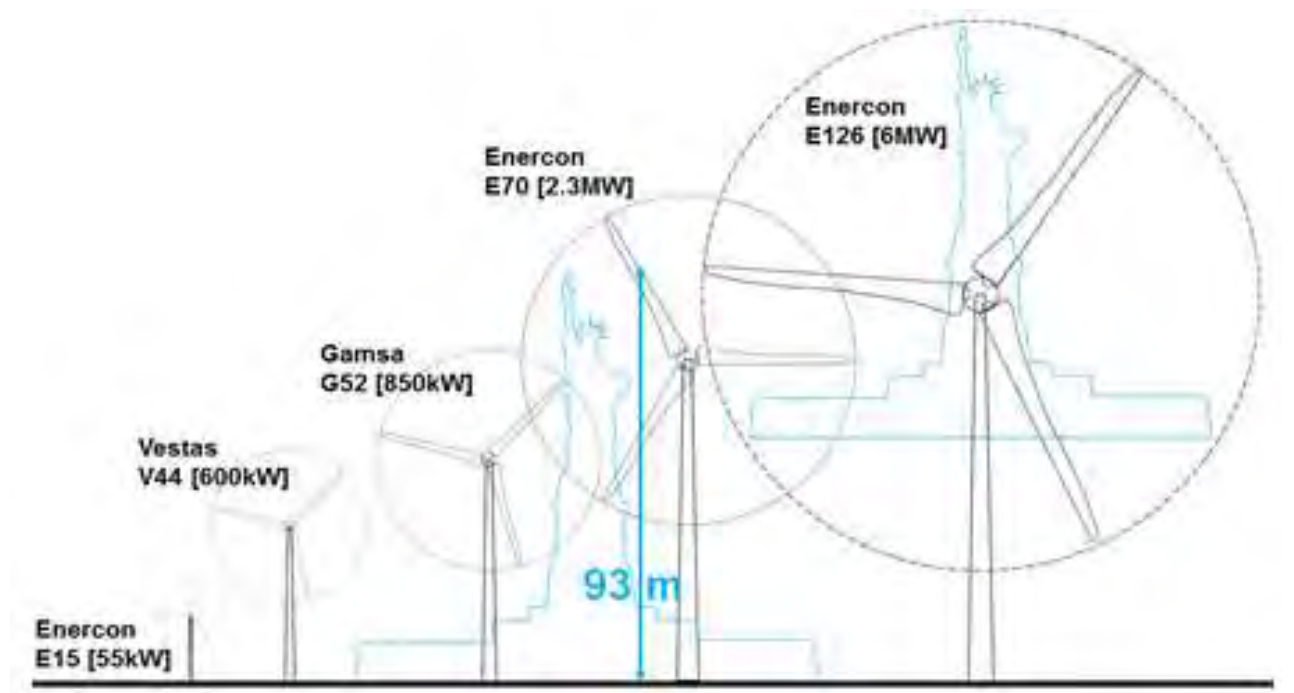
La figure ci-après (5.1.2) montre les éoliennes actuelles et les développements attendus pour les années à venir. En filigrane bleu, la statue de la liberté (93 m).

Toutefois, il convient de relever que la vitesse du vent est le paramètre déterminant de la vitesse de rotation de l'éolienne (nombre de rotations/minute) et, pour des raisons de résistance mécanique, cette dernière est limitée. Cas échéant, l'éolienne est arrêtée.

Dans ce dernier cas, éolienne arrêtée, la gravité et la vitesse du vent jouent encore un rôle. La mécanique appliquée aux éléments de glace est décrite au chapitre 7.



S-5.1.1 Schéma d'une éolienne



5.1.2 - taille des éoliennes

Le rapport prend en compte deux types d'éoliennes pour les modélisations soit :

- Enercon E82 / diamètre du rotor 82 m, puissance 2 MW
- Vestas V126 / diamètre du rotor 126 m, puissance 3.45 MW

5.2 Régimes de vents propices au fonctionnement

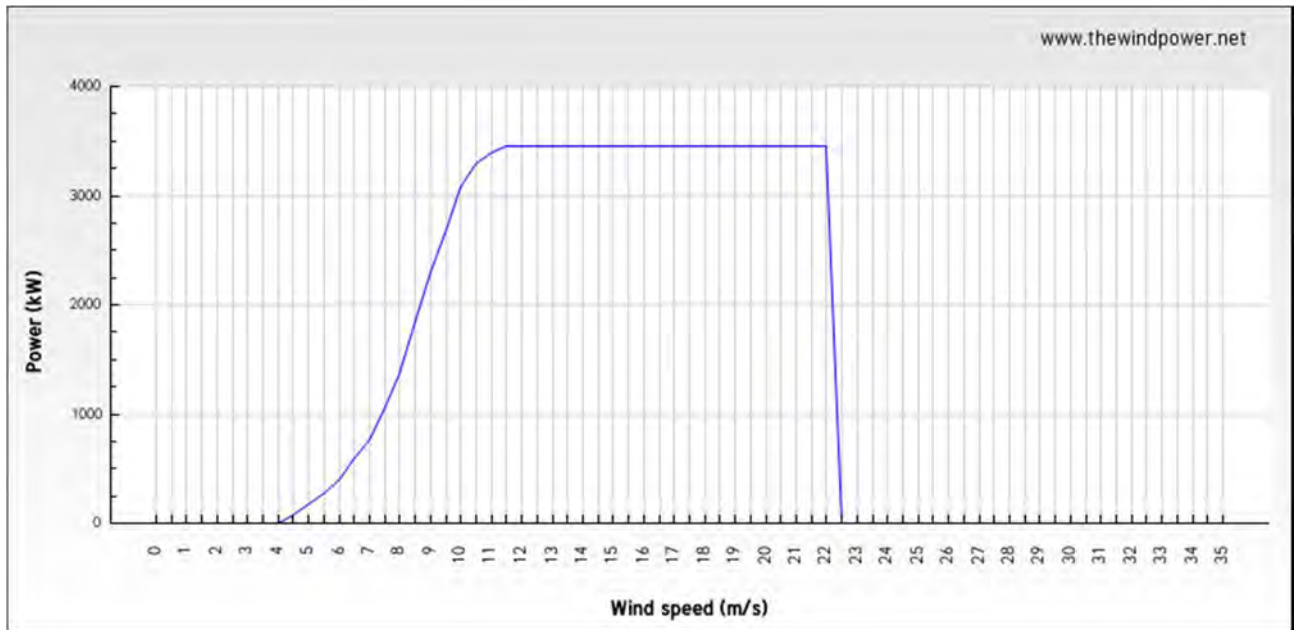
Les graphiques suivants, présentés par les maisons Vesta et Enercon concernent les éoliennes de référence de ce rapport, à savoir :

VESTAS V126

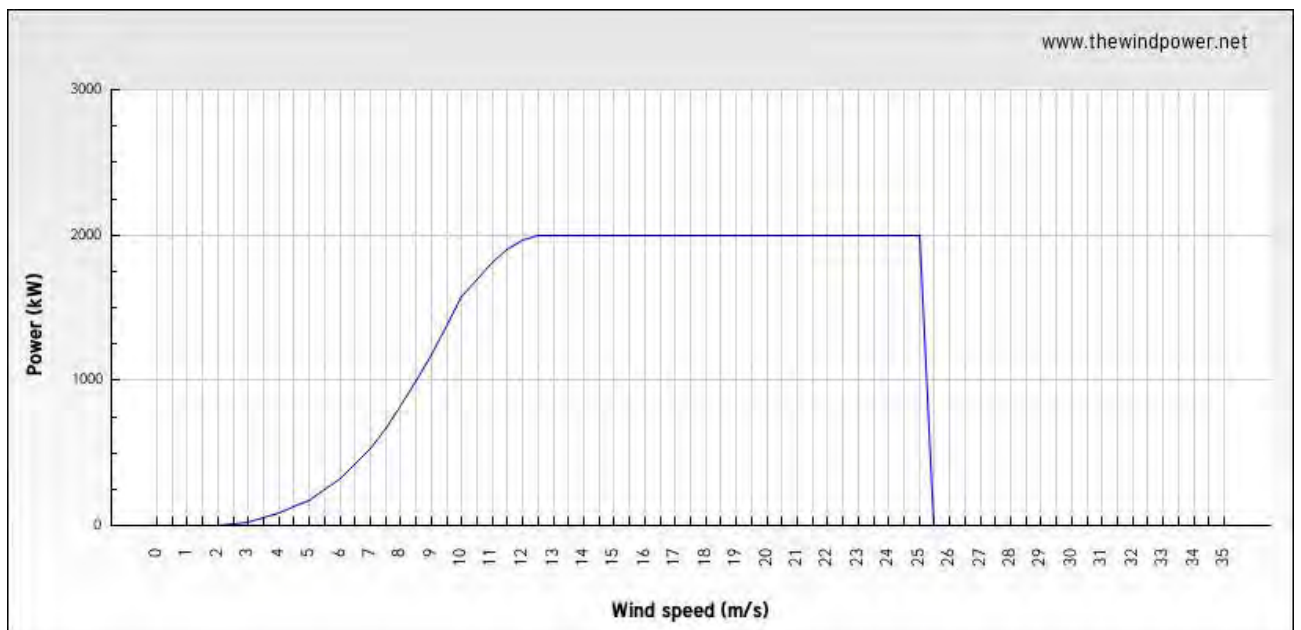
ENERCON E82

Ils montrent les régimes de vent minimum (cut-in wind speed) et maximum (cut-off wind speed) pendant lesquels le rotor tourne.

Lorsque la vitesse du vent est trop élevée, il est nécessaire d'arrêter les éoliennes afin d'éviter des dégâts aux structures.



Régime de puissance d'une éolienne Vestas V126 en fonction de la vitesse du vent [5.2.1]



Régime de puissance d'une éolienne Enercon E82 en fonction de la vitesse du vent [5.2.2]

Le régime de coupure varie d'une éolienne à l'autre, mais se situe vers 25 m/s.

6 Eoliennes : incidents et accidents

Le site internet : Caithness Windfarms United Kingdom [2.3] donne une compilation des accidents survenus avec des éoliennes depuis le 30 novembre 1980 jusqu'au 27 septembre 2016, soit 1951 accidents/incidents. Toutes les typologies d'accident ont été prises en compte (feu, glace, dommages mécaniques, ...). De cette liste, un tableau récapitulatif des accidents avec glace a été réalisé.

Les principaux accidents concernant les éoliennes sont donnés dans le tableau suivant (T-6.1).

No	Date	Lieu	Masse [kg]	Distance [m]	Conséquence	Mort	Blessé	Véhicule	Route	Chemin
24	1994	USA	> kg	?	1 mort	1				
37	1996	Germany	?	?	1 blessé		1			
38	1996	Germany	> kg	?	projection sur chemin pédestre					1
41	20.10.1996	Germany	?	?	pas de conséquence					
43	08.11.1996	Germany	kg	?	projection sur route				1	
47	10.01.1997	Germany	0.5 kg	85	pas de conséquence					
48	21.01.1997	Germany	> kg	80	projection sur route				1	
55	29.11.1997	Germany	kg	?	véhicule endommagé			1	1	
75	05.01.1999	Germany	20 morceaux	100	véhicule endommagé			1	1	
91	27.04.1999	Germany	plusieurs morceaux	70-80	pas de conséquence					
92	27.04.1999	Germany	< kg	80	pas de conséquence					
111	10.01.2000	Germany	?	50	1 blessé		1			
132	1996-2000	Germany	plusieurs morceaux	400	projection sur route				1	
167	26.02.2002	Germany	?	?	pas de conséquence					
209	08.12.2002	Germany	> 1.6 kg plusieurs	130	pas de conséquence					
288	25.06.1905	China	plusieurs morceaux	?	pas de conséquence					
291	1990-2003	Germany	880 cas !	?	?					
303	26.02.2004	Germany	> kg plusieurs	?	pas de conséquence					
324	14.11.2004	Germany	> kg plusieurs	75	projection sur route				1	
328	12.12.2004	Germany	> kg plusieurs	?	projection piste cyclable					1
329	12.12.2004	Germany	> 50 morceaux	100	projection sur route				1	
355	30.01.2005	Germany	4 morceaux	?	pas de conséquence					1
356	01.02.2005	Germany	> kg plusieurs	140	projection sur route				1	
400	17.12.2005	Germany	?	?	pas de conséquence					
422	2005-2006	Switzerland	94 cas !	?	pas de conséquence					
423	08.01.2006	Germany	> kg plusieurs	?	pas de conséquence					
487	28.12.2006	Germany	100 g plusieurs	?	pas de conséquence					
488	déc. 2006	Canada	plusieurs morceaux	?	pas de conséquence					
505	2006-2007	Switzerland	13 cas !	?	pas de conséquence					
669	04.04.2008	USA	plusieurs morceaux	?	pas de conséquence					
741	01.12.2008	UK	> kg	80	projection sur des maisons					
747	07.12.2008	Holland	?	?	projection sur route				1	
754	24.01.2009	UK	?	?	pas de conséquence					
770	02.02.2009	Canada	?	?	pas de conséquence					
772	04.02.2009	Holland	?	?	pas de conséquence					
780	23.02.2009	USA	?	?	pas de conséquence					
902	18.02.2010	Canada	?	?	pas de conséquence					
1030	15.02.2011	Canada	?	?	pas de conséquence					
1192	12.01.2012	Canada	?	?	pas de conséquence					
1814	01.12.2015	USA	?	?	pas de conséquence					
						1	2	2	9	3

T-6.1 Tableau résumé des accident/incidents impliquant de la glace

Sur les **1951 accidents/incidents reportés**, il faut relever **332 décès**, dont **1 décès dû à la glace**.

Cas no 24 : le magazine Wind Power Monthly décrit l'accident [6.1] avec précision.

La victime, Mark Ketterling, travaillait avec ses collègues dans la tour d'une éolienne en construction. C'est à l'intérieur de ladite tour qu'il a reçu un élément de glace sur son casque et a été tué sur le coup.

Les événements glace sont parfois regroupés (75, 91, 132, 209, 288, 291, 303, 324 328, 329, 355, 356, 422, 423, 487, 488, 505, 669) ce qui représente **1106 morceaux répertoriés**.

7 Accrétion de glace sur les éoliennes [7.1, 7.2]

Bien que les études ne différencient généralement pas les types de glaces (seul la masse et la distance de projection sont retenus), il nous paraît important de consacrer quelques paragraphes concernant les formes de glace. Toutes n'auront pas la même puissance d'impact au sol ou sur une personne car certaines formes sont susceptibles d'être fragmentées en vol ou au point d'impact, sans pour autant avoir de conséquences.

La glace ou accrétion apparentée apparaît de plusieurs manières sur les éoliennes en fonction des conditions climatiques (température, humidité, vent, ...), que l'éolienne tourne ou non. La condition de base est un air humide et une température en dessous de son point de congélation (solidification / freezing point en anglais) qui contient beaucoup de gouttes d'eau en surfusion [7.2].

Ces conditions sont possibles lorsque la masse d'air a pu se charger en humidité, sur de grandes étendues d'eau par exemple.

Deux processus de formation sont retenus :

⇒ **In-cloud icing** / formation de glace dans un nuage

Dans ce cas, les gouttelettes d'eau très froide, en surfusion, cristallise instantanément au contact de la pale.

⇒ **Precipitation icing** / formation de glace par précipitation

Dans ce second processus, il s'agit de l'accumulation de pluie (crachin, bruine) givrante ou de neige mouillée.

Selon la norme ISO 12494 :2012 [7.3], il convient de distinguer 4 types d'accrétion :

Precipitation icing / gouttes d'eau tombantes

- Glaze (glace par accumulation de gouttelettes)
- Wet snow (neige glacée)

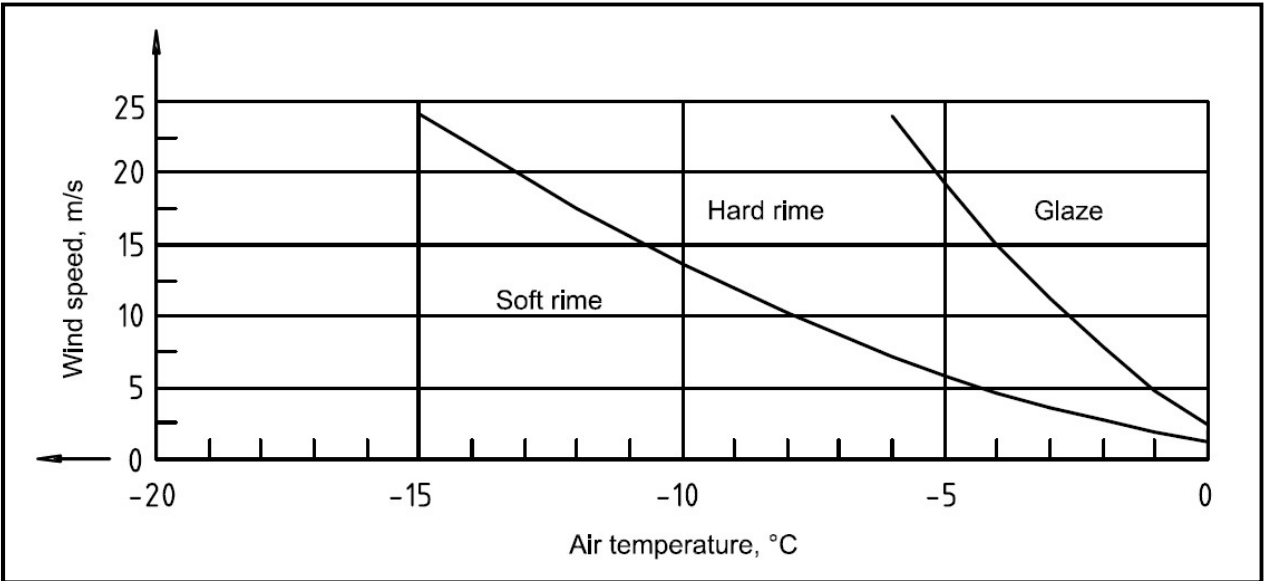
In-cloud icing / gouttes d'eau en suspension ou humidité

- Rime (givre de moyenne et forte densité)
- Hoar frost (givre de faible densité)

Chacune de ces types d'accrétion est décrite plus précisément dans les paragraphes suivants et les tableaux ci-après (T-7.1, T-7.2).

Type de glace	Tempéra- ture de l'air [°C]	Vitesse du vent [m/s]	Taille des gouttes	Eau conte- nue dans l'air	Densité de l'accrétion [kg/m³]	Adhérence de l'accrétion	Durée du phénomène
Precipitation icing / gouttes d'eau tombantes							
Glaze (pluie, cra- chin, bruine)	-10 < t _a < 0	toutes	grande	moyenne	900	forte	en heures
Wet snow (neige mouillée)	0 < t _a < +3	toutes	flocon	très élevée	300-600	faible (formation) forte (lors du gel)	en heures
In-cloud icing / gouttes d'eau en suspension							
Glaze	c.f. tableau 5.b		moyenne	élevée	900	forte	en heures
Hard rime (givre haute densité)			moyenne	moyenne	600-900	forte	en jours
Soft rime (givre moyenne densité)			faible	faible	200-600	faible à moyen	en jours
In-cloud icing / vapeur d'eau - humidité							
Hoar frost (givre faible densité)	< 0	toutes	inexistante	faible	< 200	faible	en jours

T-7.1 Description des types d'accrétion



T-7.2 - accrétions dépendant de la température et de la vitesse du vent

7.1 Glaze

Formation de glace dense et transparente lors d'épisode de pluie, de crachin ou de bruine givrante.



7.2 Wet snow

Formation de glace plus ou moins translucide et moyennement dense. Le dépôt est relativement peu adhérent au départ, mais la cohabitation d'eau liquide et solide provoque une forte adhérence au moment du gel de la fraction liquide.



7.3 Rime

Formation de glace opaque plus ou moins dense en fonction de la quantité d'eau (en surfusion) contenue dans l'air.



7.4 Hoar frost

Cristallisation opaque de vapeur d'eau (sublimation inverse) et formation de cristaux fins et friables.

Ce dernier type d'accrétion provient de la transition directe de la phase vapeur à la phase solide (sublimation inverse). Il n'est pas pris en compte dans cette étude car il n'y a pas de formation d'éléments de taille à mettre en danger les personnes ou les biens matériels.

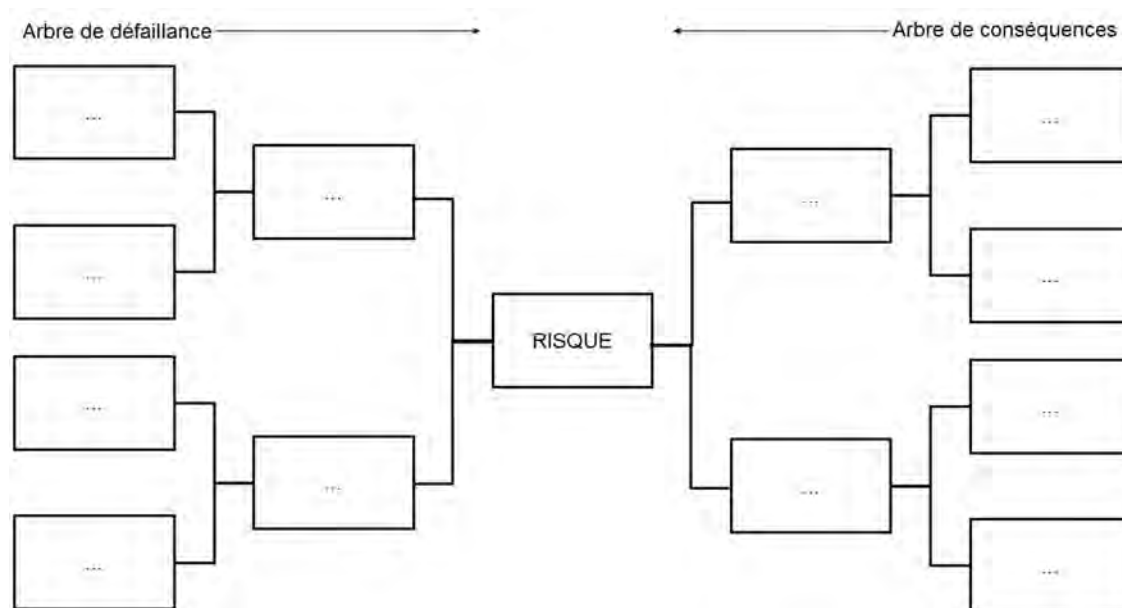


8 Principe de l'analyse de risque diagramme nœud papillon

Différentes décisions relatives aux risques nécessitent différents niveaux de réponse, et l'adaptabilité est une caractéristique clé du modèle en nœud papillon.

Le modèle en nœud papillon constitue un échéancier linéaire : le risque (événement), précédé d'une cause ou plusieurs causes (arbre de défaillance) et suivi d'une ou plusieurs conséquences (arbres de conséquences).

Ainsi, le risque est le « corps du papillon » et la ou les cause(s) et la ou les conséquence(s) sont les « ailes du papillon ».



Exemple de diagramme nœud papillon

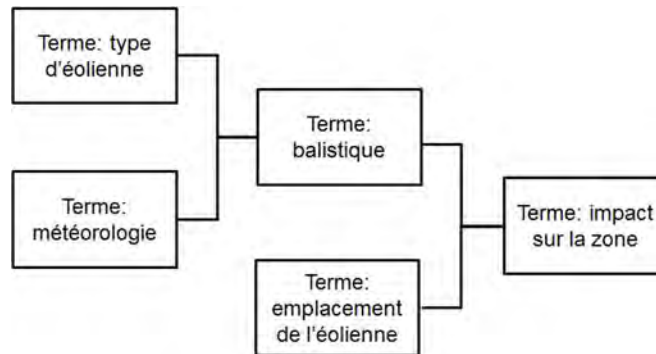
L'arbre de défaillance présente les termes menant à la réalisation du risque ; en l'occurrence, la chute ou la projection de glace sur le site éolien. L'arbre de conséquences présente les effets attendus avec la probabilité connexe.

L'analyse de risque peut être rétrospective quand la statistique des cas avérés le permet, sinon elle doit être prospective en tenant compte de probabilités individuelles d'événements similaires.

Les mesures, quant à elles, peuvent être portée sur les causes, par exemple diminuer le risque de givre en chauffant certains éléments, comme sur les conséquences, par exemple en interdisant l'accès aux zones de chute de glace.

9 Descriptions des termes de l'arbre de défaillance

Les termes suivants doivent être étudiés afin de définir les probabilités d'une projection ou d'une chute de glace sur la zone concernée.



Développement de l'arbre de défaillance

9.1 Terme type d'éolienne

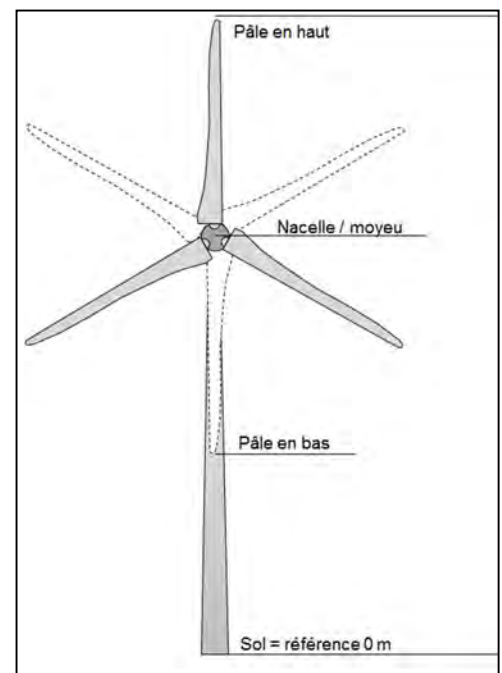
La géométrie de l'éolienne, plus particulièrement la hauteur du moyeu, de la nacelle et le rayon du rotor sont les paramètres déterminant du calcul.

Pour le cas de la chute de glace, seul entre en compte la hauteur de chute et la vitesse du vent.

Pour la projection de glace, la vitesse de rotation intervient en plus.

Bien évidemment, plus la hauteur de chute est grande, plus l'énergie cinétique acquise sera élevée. De même, plus la vitesse de rotation est élevée, plus l'énergie de projection est grande (principe de la fronde).

Les paramètres nécessaires pour le calcul de la vitesse à l'extrémité d'une pale sont :



r = rayon du rotor (distance moyeu - extrémité de la pale) [m]

ν = fréquence de rotation du rotor [rotation/min] ramenée à l'unité de temps [rotation/s] ou [s⁻¹]

P_p = périmètre décrit par l'extrémité de la pale = $2\pi r$ [m]

Ainsi, pour une Vesta V126 ayant un rotor de 126 m de diamètre et pour une fréquence de rotation de 6 tours par minute, la vitesse à l'extrémité des pales est de 142 km/h.

9.2 Terme météorologie

Le terme météorologie est le plus difficile à prévoir. Si les conditions de formations de la glace sont parfaitement connues, l'évolution des conditions sur le site éolien est, lui, plus difficile à prévoir. Il se base sur les statistiques de la zone concernée.

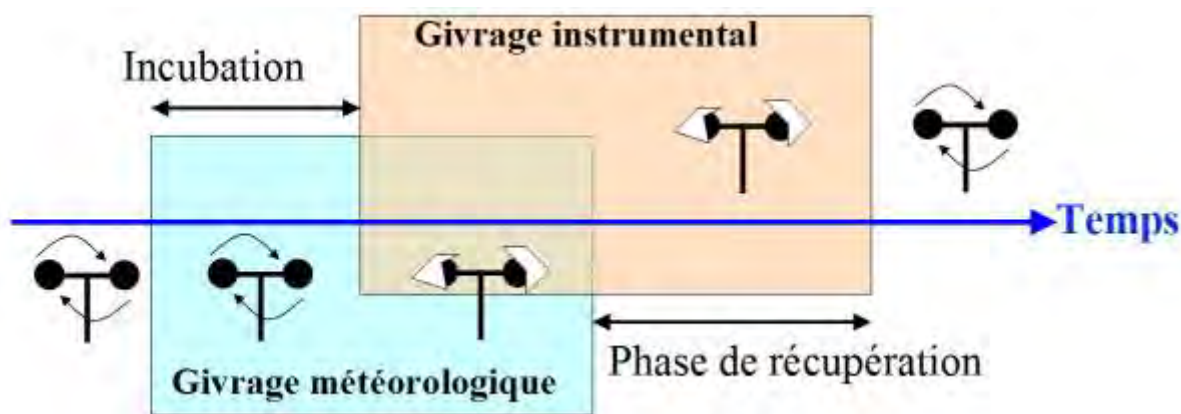
A défaut de prévisions précises à moyen et long terme, une mesure en temps réel des paramètres :

- vitesse et direction du vent ;
- température ;
- taux d'humidité ;

permettrait de prendre des mesures d'alerte, voire d'arrêt de la rotation des pales (ce qui est déjà le cas en cas de vitesse de vent trop élevée). C'est ce terme qui doit être parfaitement maîtrisé pour pouvoir utiliser correctement les logiciels de simulation.

A ce titre, le rapport final « Vereisung WEA St-Brais » du 29 août 2013 [4.3.1] décrit en détail les périodes critiques amenant au risque de projection d'éléments de glace.

Le schéma suivant montre l'apparition des phénomènes de givrage en fonction du temps.



S-9.2.1 Conditions de givrage, évolution temporelle [4.3.1]

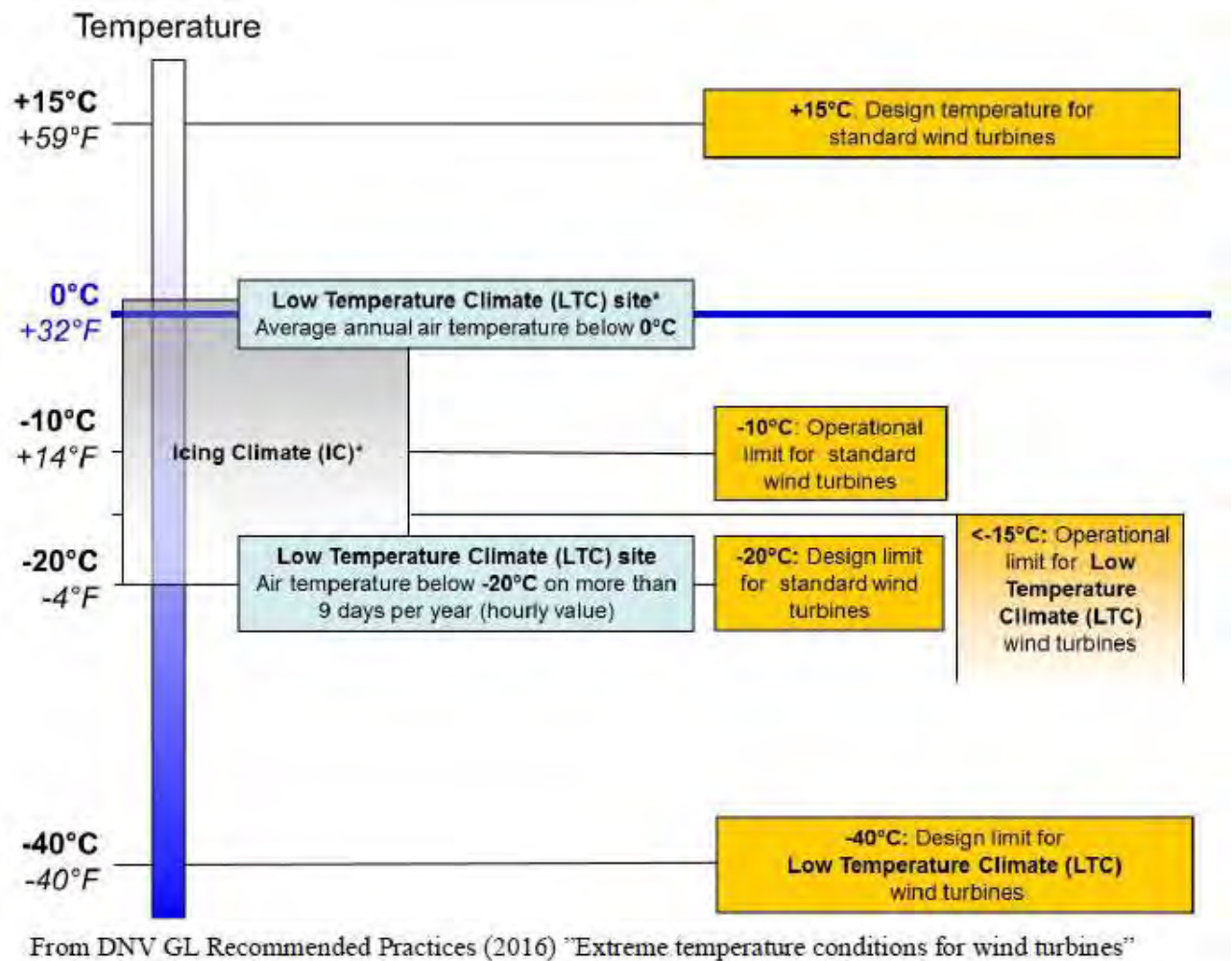
Incubation : retard entre le début de givrage météorologique et le début de givrage instrumental.

Givrage météorologique (Meteorological icing) : durée pendant laquelle les conditions météorologiques sont propices à l'accumulation de givre, donc que la glace peut se former (encadré bleu sur la figure).

Givrage instrumental / Instrumental icing : durée pendant laquelle l'instrument est givré, entraînant la perturbation de l'instrument ou de l'éolienne (encadré orange sur la figure) périodes de persistance de la glace sur les structures

Phase de récupération : retard entre la fin de givrage météorologique et la reprise de l'opération normale de l'instrument ou de l'éolienne.

Il est intéressant de mettre en relation schéma proposé dans l'étude d'IEA Wind [9.2.1] avec le schéma (S-9.2.1) sur les conditions de givrage.

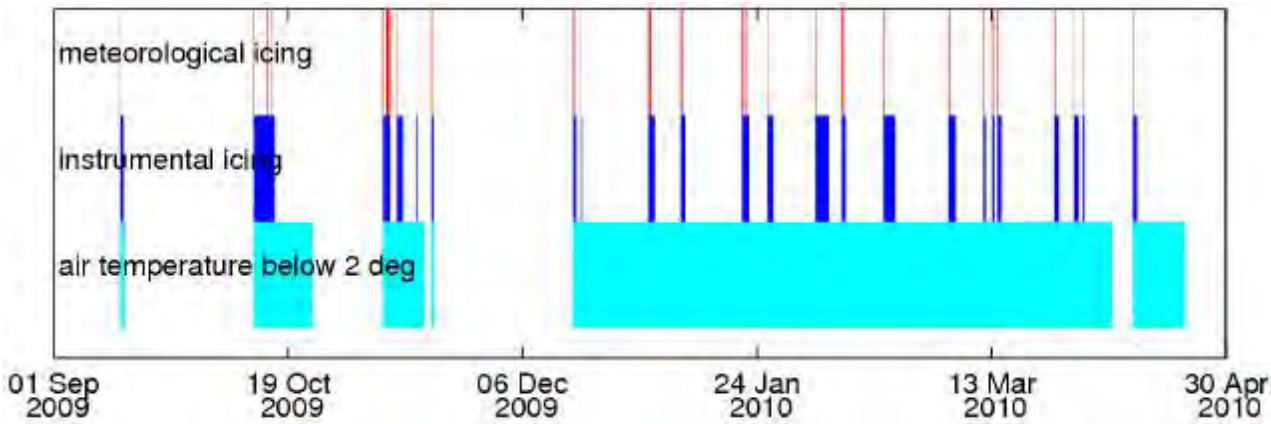


S-9.2.2 Types de turbine en fonction de la température [9.2.1]

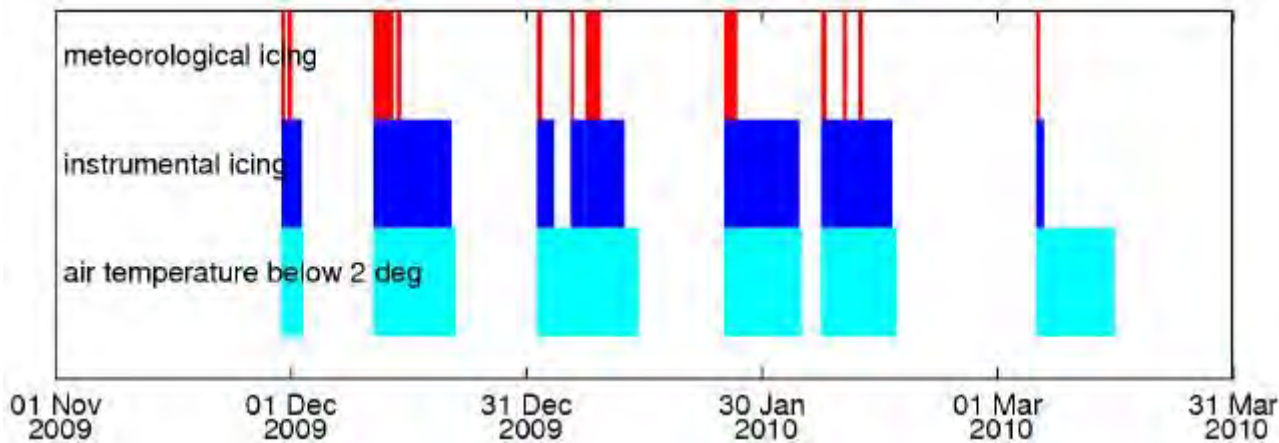
L'approche présentée en page 38 du même document est importante pour définir des mesures proportionnées aux risques, le point clef étant le carré 3) nombre d'impacts par m² et par an.



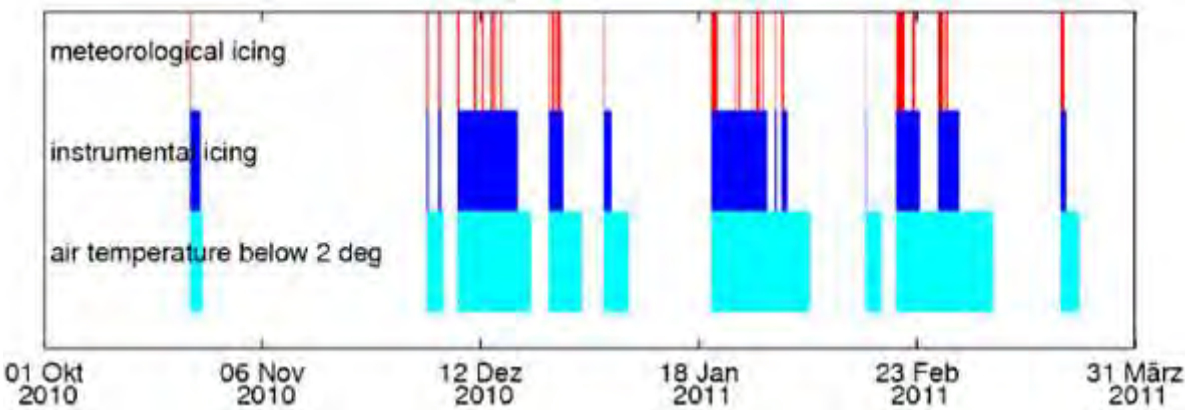
Le graphique ci-dessous [4.3.1] est un exemple de ce qui a été mesuré sur le site de Gütsch entre le 1^{er} septembre 2009 et le 30 avril 2010.



En comparaison [4.3.1], St-Brais entre le 1^{er} novembre 2009 et le 31 mars 2010



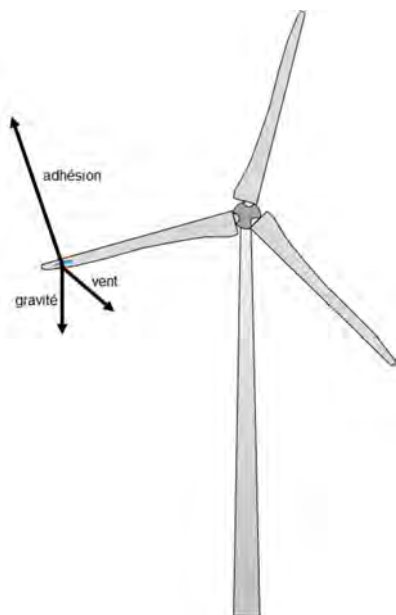
En comparaison [4.3.1], St-Brais entre le 1^{er} octobre 2010 et le 31 mars 2011.



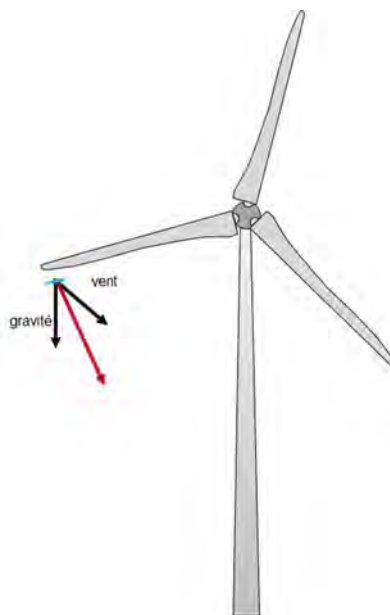
9.3 Terme balistique

La glace accumulée sur les pales peut se détacher sous forme de bloc de masse variable. 4 cas physiques sont à décrire : la glace est collée à la pale et le moment où se détache la glace pour une éolienne à l'arrêt et en rotation. Sans entrer dans des considérations physiques poussées et des formules mathématiques, les schémas suivants résument les effets qui s'appliquent sur la glace.

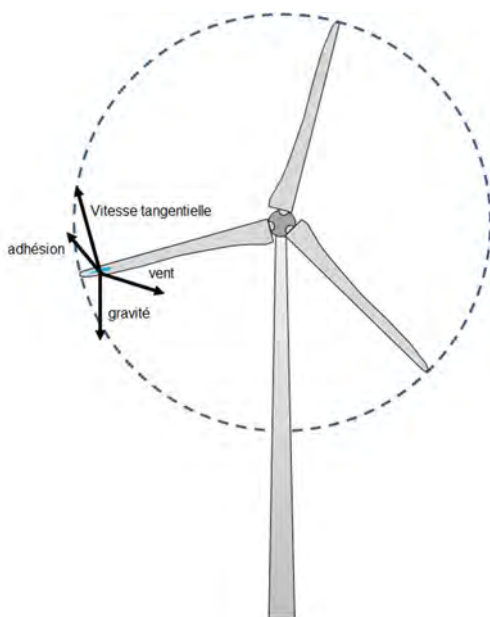
On parle de chute de glace lorsque l'éolienne n'est pas en rotation et de projection de glace lorsque le rotor tourne.



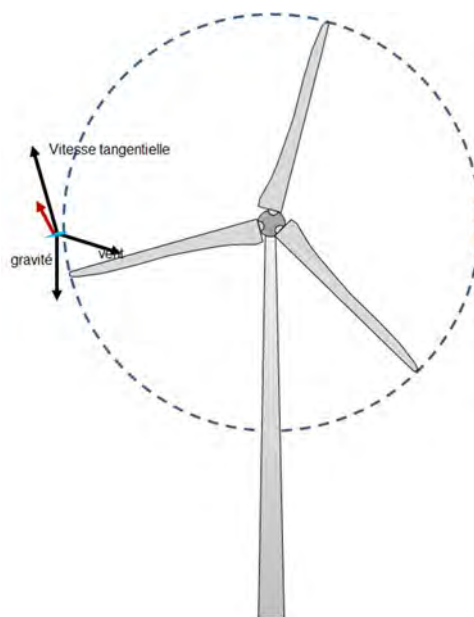
A : Eolienne arrêtée, glace collée



B : Eolienne arrêtée, glace décollée



C : Eolienne en rotation, glace collée



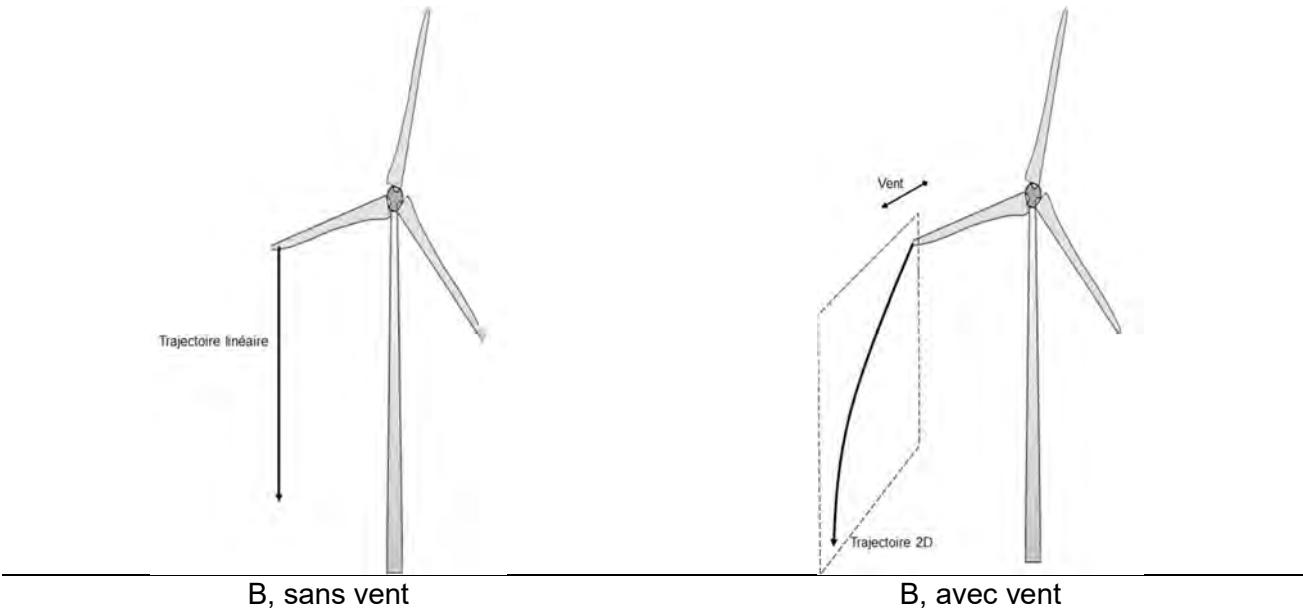
D : Eolienne en rotation, glace décollée

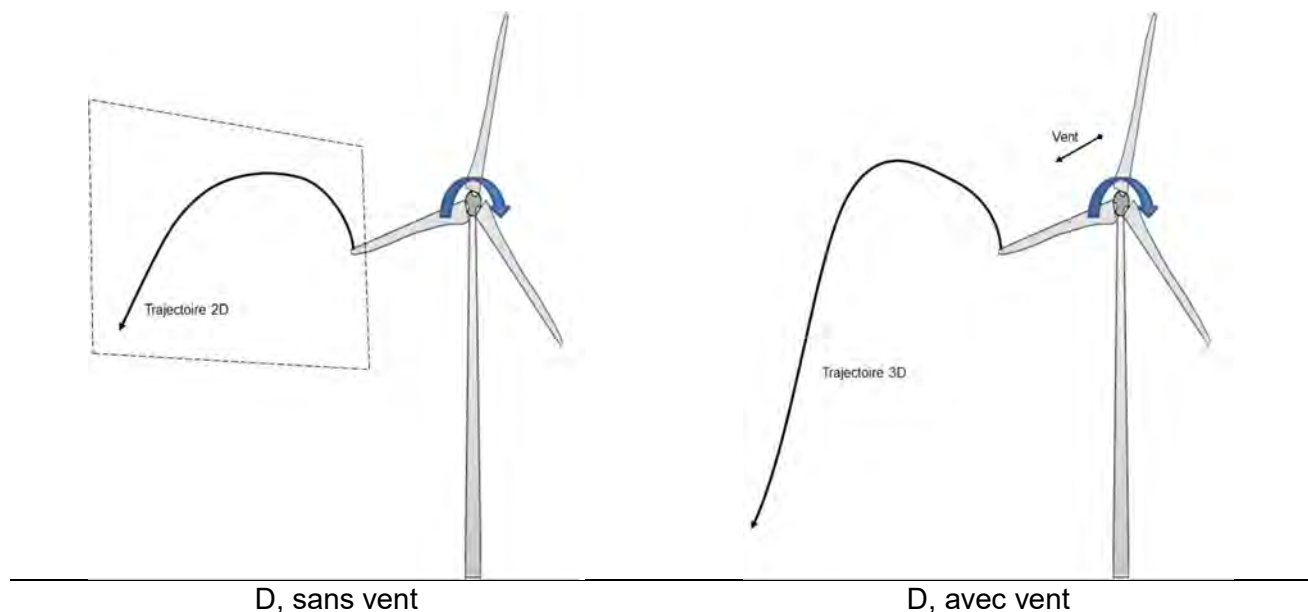
9.3.1 Description des forces en présences

Le tableau ci-après décrit les effets dans les différentes conditions de fonctionnement de l'éolienne lorsque la glace adhère et au moment du décollement de la glace.

Situation	Effets sur la glace			
	Gravité	Vent	Vitesse tangentielle	Adhésion
A Eolienne arrêtée, glace collée	Constante en intensité et direction	Variable en intensité et direction	Nulle	Supérieure à la résultante des forces exercées
B Eolienne arrêtée, glace décollée	Constante en intensité et direction	Variable en intensité et direction	Nulle	Nulle
C Eolienne rotation, glace collée	Constante en intensité et direction	Variable en intensité et direction	Proportionnelle à la fréquence de rotation et diamètre du rotor	Supérieure à la résultante des forces exercées
D Eolienne rotation, glace décollée	Constante en intensité et direction	Variable en intensité et direction	Proportionnelle à la fréquence de rotation et diamètre du rotor	Nulle

Ainsi, pour résumer les trajectoires au moment où la glace se détache :





9.3.2 Impacts, énergie, force

L'impact d'un morceau de glace, qu'il tombe uniquement par gravité ou qu'il soit éjecté par rotation peut conduire à des lésions ou le décès de la personne impactée.

La masse du morceau de glace et sa vitesse de chute seront les paramètres déterminants. En effet, un petit morceau très rapide peut avoir un impact énergétique identique à un morceau plus lourd et plus lent.

A ce titre, il convient de rappeler la formule de calcul de l'énergie cinétique :

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} * m * v^2$$

où : E_{cin} = énergie cinétique [J]

m = masse [kg]

v = vitesse [m/s]

et de l'énergie potentielle :

$$E_{\text{pot}} = m * g * h$$

où : E_{pot} = énergie potentielle [J]

m = masse [kg]

h = hauteur de chute [m]

La loi de la conservation de l'énergie postule que :

$$E_{\text{cin}(x)} + E_{\text{pot}(x)} = E_{\text{cin}(y)} + E_{\text{pot}(y)}$$

où h est la distance verticale entre x et y.

En considérant que x est la position de départ de la glace (collée sur la pale ou la nacelle) et que y est au moment de l'impact au sol, on peut considérer que $E_{\text{cin}(x)}$ est nulle et $E_{\text{pot}(y)}$ est nulle.

La loi de conservation de l'énergie qui s'applique à notre élément de glace au moment de l'impact au sol est :

$$E_{\text{pot}(x)} = E_{\text{cin}(y)} \quad \text{ou} \quad m * g * h = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Du point de vue du calcul des forces, la relation de base est :

$$F = m * a$$

où :

F = force [N]

m = masse [kg]

a = accélération [m/s^2]

et l'énergie est reliée à la force par la relation :

$$F * d = E$$

où :

F = force [N]

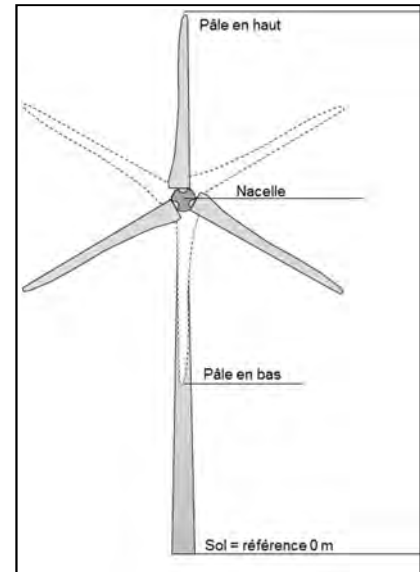
d = distance [m]

E = énergie [J] ou [Nm]

A titre d'exemple et pour donner un ordre de grandeur, sans tenir compte des forces de frottement, les valeurs maximales d'énergie et de force sont données dans le tableau suivant.

La distance d'arrêt de l'objet en chute libre est capitale dans le calcul de la force transmise. 1 mm est l'ordre de grandeur de déformation d'un crâne « fixe ». 1 à 2 cm comprendrait le déplacement de la tête dans l'axe vertical.

Le schéma ci-contre donne les hauteurs de calcul.



Eolienne type	Hauteur de chute [m]	Masse de glace [g]	E_{cin} [J]	v [m/s] [km/h]		F [kN] Arrêt 1 mm	F [kN] Arrêt 1 cm	F [kN] Arrêt 2 cm
Enercon E82* 	49 Pâle en bas	45.93**	22	31	112	22	2.2	1.1
		100	48			48	4.8	2.4
		1000	481			481	48	24
		10'000	4807***			4807	481	240
	90 Nacelle	45.93**	41	42	151	41	4.1	2.0
		100	88			88	8.8	4.4
		1000	883			883	88	44
		10'000	8829***			8829	883	441
	139 Pâle en haut	45.93**	63	52	188	63	6.3	3.1
		100	136			136	14	6.8
		1000	1364			1364	136	68
		10'000	13'636***			13'636	1364	682
Vesta V126* 	54 Pâle en bas	45.93**	24	33	117	24	2.4	1.2
		100	53			53	5.3	2.6
		1000	530			530	53	26
		10'000	5297***			5297	530	265
	117 Nacelle	45.93**	53	48	173	53	5.3	2.6
		100	115			115	11	5.7
		1000	1148			1148	115	57
		10'000	11'478***			11'478	1148	574
	180 Pâle en haut	45.93**	81	59	214	81	8.1	4.1
		100	177			177	18	8.8
		1000	1766			1766	177	88
		10'000	17'658***			17'658	1766	883

* éolienne de référence

** poids normé d'une balle de golf,

*** valeurs pessimistes car les forces de frottement ne sont pas prise en compte

A titre comparatif, voici les résultats balistiques pour d'autres constructions.

Structure type	Hauteur de chute [m]	Masse de glace [g]	E_{cin} [J]	v [m/s] [km/h]	F [kN] Arrêt 1 mm	F [kN] Arrêt 1 cm	F [kN] Arrêt 2 cm
Tour (OFS NE) 	50 m Toiture	45.93**	16	31 113	16	1.6	0.79
		100	49		49	4.9	2.4
		1000	491		490	49	24
		10'000	4905***		4905	490	245
Pylône chat (Coulange) 	35 Haut du Pylône	45.93**	23	26 94	23	2.3	1.1
		100	34		34	3.4	1.7
		1000	343		343	34	17.2
		10'000	3434***		3434	343	172

** poids normé d'une balle de golf

*** valeurs pessimistes car les forces de frottement ne sont pas prise en compte

9.4 Terme emplacement de l'éolienne

L'emplacement de l'éolienne joue un rôle dans l'étude de risque, plus particulièrement du point de vue accès au sol et accès par voie des airs.

Chaque éolienne ou parc éolien doit être pris en compte de manière individuelle afin de déterminer le rayon d'action des éléments de glace projetés.

Plus particulièrement, il faut prendre en compte les routes d'accès ou de transit, les chemins pédestres et les éventuelles pistes de ski.

9.5 Conséquences sur la zone impactée

Ces conséquences sont essentiellement celles sur l'être humain. Il convient d'y voir deux grands scénarios :

- impact direct sur une personne
- impact sur un véhicule transportant plusieurs personnes

9.5.1 Impact sur les personnes

Les personnes peuvent donc être atteinte de manière directe ou indirecte.

- Direct : projection ou chute de glace sur une personne
- Indirect : projection de glace sur un aéronef ou un véhicule terrestre aboutissant à la perte de maîtrise ; les blessures sont celles d'un accident de transport

9.5.2 Impact sur un véhicule

Cet aspect est pris en compte de manière similaire à n'importe qu'elle chute d'objet sur un véhicule terrestre ou l'entrée en contact avec un aéronef.

Bien que les éoliennes soient dans des endroits peu fréquentés, une interaction avec un chemin d'accès ou une route de transit ne peut être exclue. Des lésions directes de personnes se trouvant à l'intérieur de véhicules sont possibles avec les éléments de glace les plus lourds.

La taille de l'élément joue un rôle, tout comme les réactions du conducteur / pilote.

On peut aisément comparer une projection de glace avec un caillou, une pive ou une collision avec un oiseau de petite taille. Tant que le pare-brise n'est pas significativement endommagé, le conducteur est finalement dans une situation identique à celle rencontrée sur route.

A contrario des éléments de glace de taille supérieur (> 50 g) peuvent détruire le pare-brise ou créer un choc suffisant pour déstabiliser le conducteur.



Les normes ISO 3537 et 15082 [9.6.2.1] définissent les conditions de test de résistances des éléments vitrés de sécurité. Il faut relever les tests d'impact avec 227 g (détachement d'éclats ne dépassant pas 0.1 g) et 2260 g (l'élément ne traverse pas le vitrage, au moins pendant les 5 secondes suivant l'impact).

Le pare-brise avant est un verre feuilleté et, même en cas d'impact, les éclats sont maintenus ensemble par le film intermédiaire. Toutefois, un simple choc tel qu'un gravillon à grande vitesse peut déjà provoquer une étoile ou un éclat au pare-brise.

A moins d'avoir eu un impact avec un morceau de glace de plusieurs kilogrammes, seul des conséquences indirectes, perte de maîtrise, sont réellement significatives.

9.5.3 Aspects médicaux de l'impact d'éléments de glace

L'aspect médical a été pris en compte par un contact direct avec l'Homme et plus particulièrement un contact direct avec la tête.

L'effet sur le crâne dépend de la force d'impact. The Open Biomedical Engineering Journal [9.5.3.1] reporte les effets présentés dans le tableau suivant.

Dommages types	Maximum ICP [kPa]	Maximum Head Force [kN]
Insignifiant	$P < 25$	$F < 2.5$
Inconscience	$25 \leq P < 45$	$2.5 \leq F < 5.0$
Dégâts internes (meningeal damage)	$45 \leq P < 150$	$5.0 \leq F < 7.5$
Dégâts osseux (bone damage)	$P \geq 150$	$F \geq 7.5$

En reprenant les tableaux du § 9.3.2, on peut montrer la relation entre la chute d'un élément de glace et les effets sur la personne. On considère que la personne reçoit un élément de glace à la verticale de l'éolienne et que le crâne encaisse le choc directement (enfoncement de l'os) ou avec un amortissement par la colonne vertébrale (1 ou 2 cm).

Cette démonstration ne prend pas en compte l'effet du vent ou de la rotation de l'éolienne. Il s'agit seulement de montrer des ordres de grandeur obtenus.

Eolienne type	Hauteur de chute [m]	Masse de glace [g]	E_{cin} [J]	v [m/s] [km/h]	F [kN] Arrêt 1 mm	F [kN] Arrêt 1 cm	F [kN] Arrêt 2 cm
 Enercon E82*	49 Pale en bas	45.93**	22	31 112	22	2.2	1.1
		100	48		48	4.8	2.4
		1000	481		481	48	24
		10'000	4807***		4807	481	240
	90 Nacelle	45.93**	41	42 151	41	4.1	2.0
		100	88		88	8.8	4.4
		1000	883		883	88	44
		10'000	8829***		8829	883	441
	139 Pale en haut	45.93**	63	52 188	63	6.3	3.1
		100	136		136	14	6.8
		1000	1364		1364	136	68
		10'000	13'636***		13'636	1364	682
 Vesta V126*	54 Pale en bas	45.93**	24	33 117	24	2.4	1.2
		100	53		53	5.3	2.6
		1000	530		530	53	26
		10'000	5297***		5297	530	265
	117 Nacelle	45.93**	53	48 173	53	5.3	2.6
		100	115		115	11	5.7
		1000	1148		1148	115	57
		10'000	11'478***		11'478	1148	574
	180 Pale en haut	45.93**	81	59 214	81	8.1	4.1
		100	177		177	18	8.8
		1000	1766		1766	177	88
		10'000	17'658***		17'658	1766	883

*éolienne de référence

** poids normé d'une balle de golf,

*** valeurs pessimistes car les forces de frottement ne sont pas prise en compte

Même démarche pour les autres constructions.

Structure type	Hauteur de chute [m]	Masse de glace [g]	E_{cin} [J]	v [m/s] [km/h]	F [kN] Arrêt 1 mm	F [kN] Arrêt 1 cm	F [kN] Arrêt 2 cm
Tour (OFS NE) 	50 m Toiture	45.93**	16	31 113	16	1.6	0.79
		100	49		49	4.9	2.4
		1000	491		490	49	24
		10'000	4905***		4905	490	245
Pylône chat (Coulange) 	35 Haut du Pylône	45.93**	23	26 94	23	2.3	1.1
		100	34		34	3.4	1.7
		1000	343		343	34	17
		10'000	3434***		3434	343	172

** poids normé d'une balle de golf,

*** valeurs pessimistes car les forces de frottement ne sont pas prise en compte

9.6 Autres impacts d'éléments de glace

9.6.1 Survol d'éoliennes par des avions ou hélicoptères

Les éoliennes sont pourvues d'un système de feu clignotant rouge signalant le danger.



Lampe à éclats sur une éolienne



Lampes de signalisation sur des grues

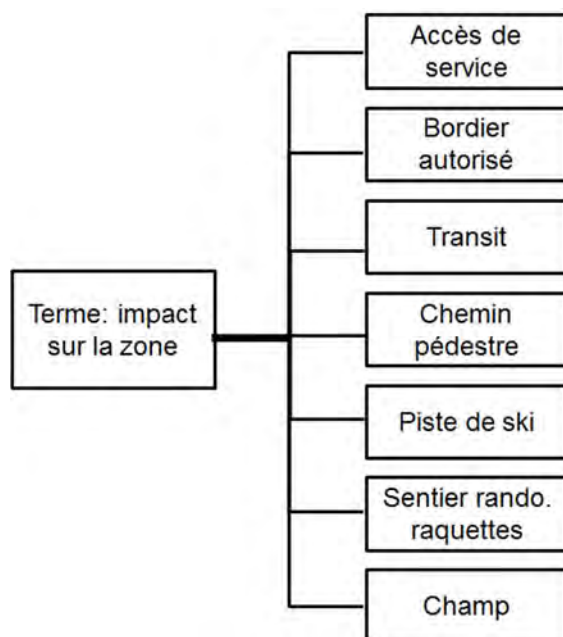
Les normes OACI sont claires sur le survol des constructions dangereuses et le phénomène d'éjection d'éléments de glace ne représente pas un problème particulier pour l'aviation.

Il convient encore de rappeler que sur demande, les éoliennes peuvent être arrêtées pour faciliter des opérations de secours.

9.6.2 Impacts sur un casque

Une personne casquée sera partiellement protégée en cas d'impact avec un morceau de glace. Toutefois, le casque n'est pas une protection absolue, preuve en est l'accident mortel cité au § 6. Les casques de protection doivent répondre à la norme EN 397 pour être pris en compte.

10 Descriptions des termes de conséquences



10.1 Terme cheminement pour véhicule

Les véhicules peuvent emprunter plusieurs types de routes à proximité des éoliennes. Le tableau suivant décrit le type de routes et d'utilisateurs.

Type de route	Description	Fréquence d'utilisation	Nombre maximal de personnes par véhicule
Accès de service	Accès autorisé uniquement au personnel de l'entreprise propriétaire de l'éolienne	Faible	5
Bordiers autorisés	Accès aux résidents et au personnel de l'entreprise propriétaire de l'éolienne	Moyenne - élevée	5
Transit	Route communale ou cantonale sans restriction de trafic	Elevée à très élevée	> 5 (car, ...)

Chaque site éolien doit prendre en compte la zone de projection de l'éolienne et toutes les routes qui y passent. Il conviendra de définir une surface couverte par les routes, la vitesse moyenne de transit et la surface moyenne des véhicules.

10.2 Terme cheminement pour piétons

Les piétons peuvent bien évidemment utiliser les routes, mais aussi des voies qui leur sont propre. Le tableau suivant décrit le type de voies piétonnières.

Type de route	Description	Fréquence d'utilisation	Personnes pouvant être atteinte par un élément
Chemin pédestre	Voies de largeurs insuffisantes pour le passage des véhicules	Faible	1
Piste de ski	Pistes tracées	Moyenne - élevée	1
Piste pour randonnée En raquettes	Pistes balisées	Elevée à très élevée	1
Champ	Surface sans aménagements de voies piétonnières	Très faible - faible	1

Chaque site éolien doit prendre en compte la zone de projection de l'éolienne, toutes les routes et les voies pédestres qui y passent. Il conviendra d'une définir une surface couverte par les routes et voies pédestres, la vitesse moyenne de transit et la surface l'emprise au sol moyenne d'une personne.

Il est très difficile de trouver des statistiques concernant l'occupation des routes, des chemins piétons, des pistes de ski ou de randonnées raquettes. Ceci dépendant bien évidemment du site, de son accessibilité en véhicule et de son intérêt géographique et touristique. Il faut toutefois poser une base afin de pouvoir réaliser des calculs dont l'ordre de grandeur est représentatif.

Le moment de la journée, la saison, le jour de la semaine, les congés spéciaux, etc. sont autant de paramètres variables.

Les valeurs définies par la suite sont voulues péjoratives et extrémistes afin de ne pas pouvoir être contestées dans le sens de la sous-estimation du danger.

10.3 Terme personne stationnaire

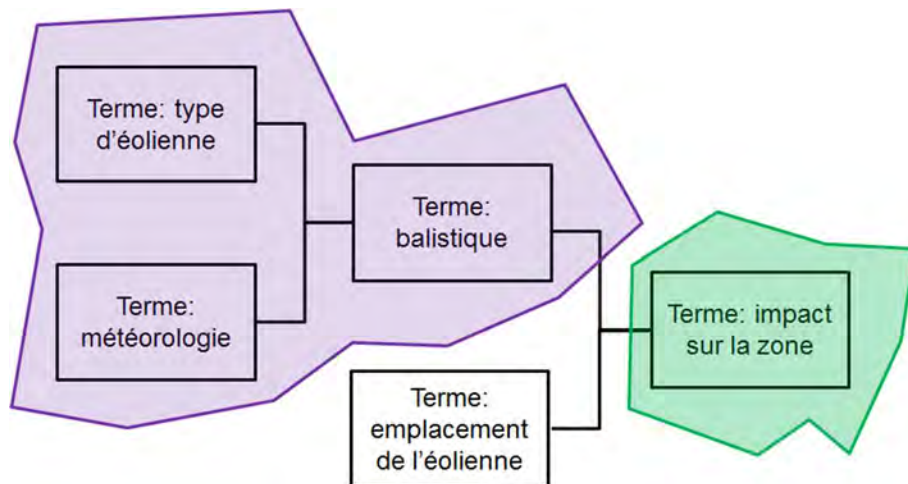
Il faut encore prendre en compte le fait qu'une personne pourrait s'arrêter en zone dangereuse (pic-nic par exemple), même si la météorologie n'est pas propice à un tel arrêt et que le bon sens de la personne devrait aussi s'opposer.

11 Application du diagramme nœud papillon aux éoliennes

La modélisation d'accrétion de glace est une préoccupation non seulement pour les éoliennes, mais aussi dans d'autres domaines telle que l'aéronautique. La NASA a étudié le problème en 1990 [11.1], Plus récemment, Meteotest a réalisé des modélisations dans ce domaine. Les résultats obtenus sont difficilement comparables aux résultats des observations de terrain. En effet, ces derniers sont peu nombreux et l'incertitude des mesures grande.

Les termes mis en évidence en violet dans le schéma suivant sont ceux couverts par les modélisations fournies par Meteotest. Toutefois, pour pouvoir être utilisé dans l'analyse de risques, il faut pouvoir mettre une fréquence d'impact par m² et par an. L'échelle relative citée dans le document de Meteotest « Gutachten zu Eiswurfrisiko und Vereisungsverluste » daté du 11 février 2016 ne répond pas directement aux besoins.

L'interprétation et la relation quantitative est mis en exergue par la zone verte du schéma. Le terme d'impact sur la zone est l'information ultime recherchée. Pour atteindre ce but, le rapport « Vereisung WEA St-Brais » en est la clef.



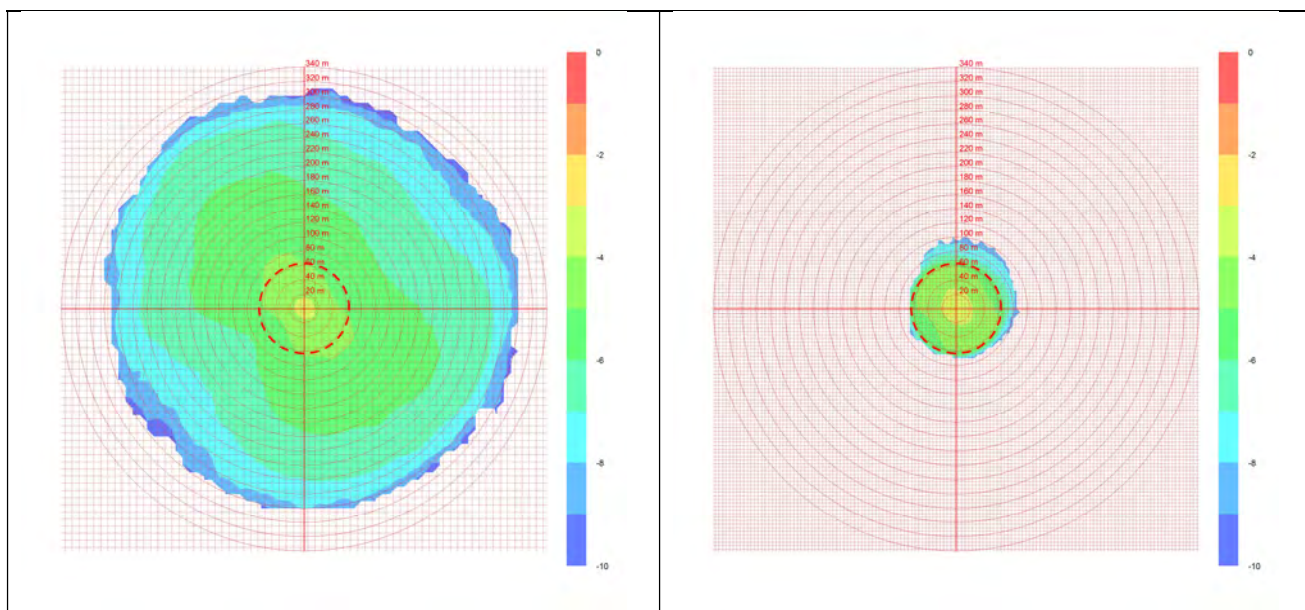
Définition des termes clefs

La quantification des termes est nécessaire pour pouvoir chiffrer et comparer avec d'autres analyses de risques. Le terme impact sur la zone étant la résultante des termes de l'arbre de défaillance.

Le terme emplacement de l'éolienne est capital. Il doit être pris en compte dès le projet, une fois ce dernier arrêté, plus aucune influence ne pourra être mise sur l'emplacement.

L'analyse de risque ne pourra être correcte que si elle est représentative du site où elle doit s'appliquer. Ainsi, il n'est pas possible de dresser une analyse de risque pouvant être appliquée directement d'un site à l'autre. Pour cette raison, il s'agit de définir des probabilités pour des termes précis qui seront ensuite adaptés proportionnellement au site défini.

Les deux représentations graphiques suivantes présentent un résultat de modélisation pour une éolienne Vestas V126, avec un risque de chute et de projection.



Projection de glace cas no 3

Chute de glace cas no 3

Ces diagrammes sont intéressants et peuvent être reportés sur une carte géographique pour définir les zones dangereuses et identifier les voies de passage critique.

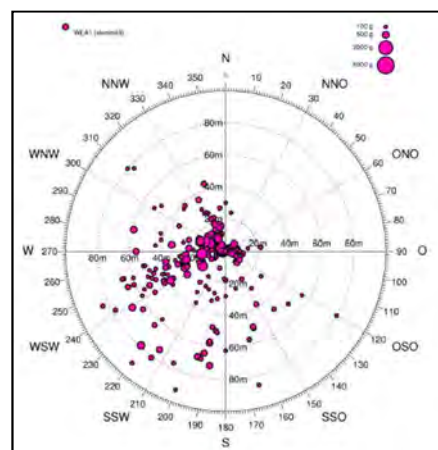
Il reste à prendre en compte les impacts réellement mesurés sur le site de St-Brais afin d'avoir une vision quantitative sur une zone donnée.

Il est toutefois extrêmement difficile de relier la probabilité d'impact, la taille de l'élément de glace et la position d'impact.

11.1 Résultats d'impacts

A partir des diagrammes d'impact (exemple à droite), on peut tirer les statistiques suivantes :

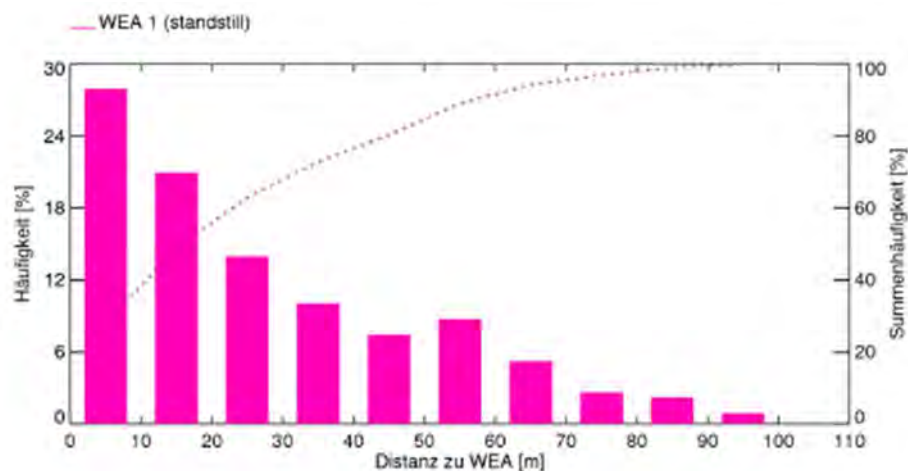
- Probabilité d'impact en fonction de la distance
- Probabilité d'impact en fonction de l'angle
- Probabilité d'impact en fonction de la masse de glace
- Masse de glace en fonction de la distance



[4.3.1]

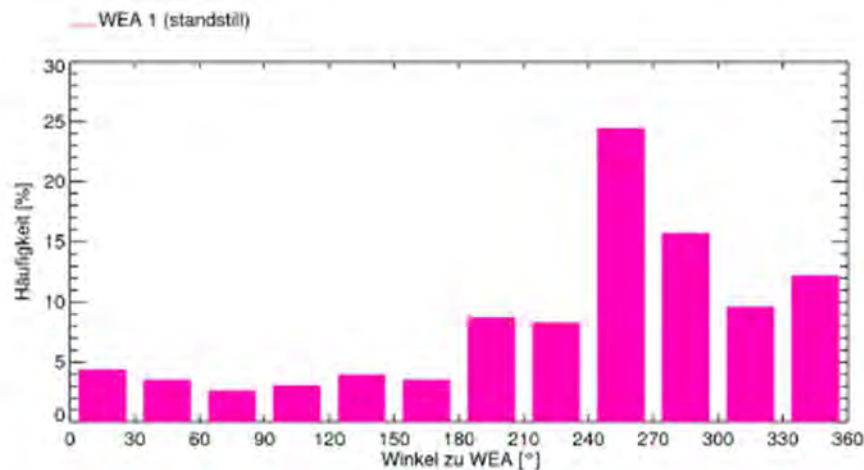
11.1.1 Résultats d'impacts à Gütsch

Le même graphique de report des masses de glace en fonction des distances permet de montrer que 'on retrouve les mêmes quadrants simplifiés, mais avec des distances et des masses supérieures.



Statistique d'impact en fonction de la distance [4.3.1]

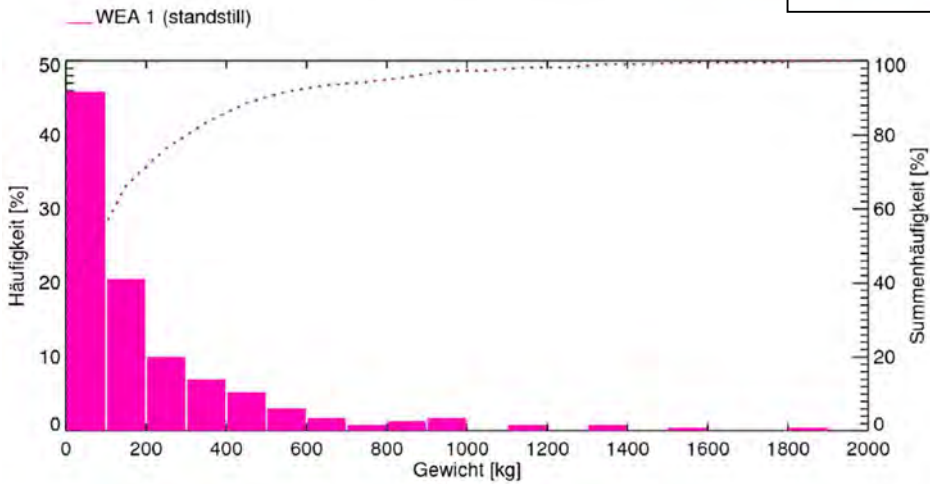
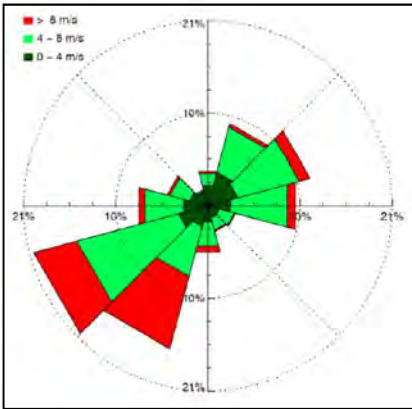
Sans surprise, le nombre d'impact diminue avec la distance selon une loi en fonction du carré de la distance. Ce graphique ne permet pas, à contrario, de tirer un lien direct avec le poids des éléments de glace.



Statistique d'impact en fonction de l'angle (prise en compte des vents dominants) [4.3.1]

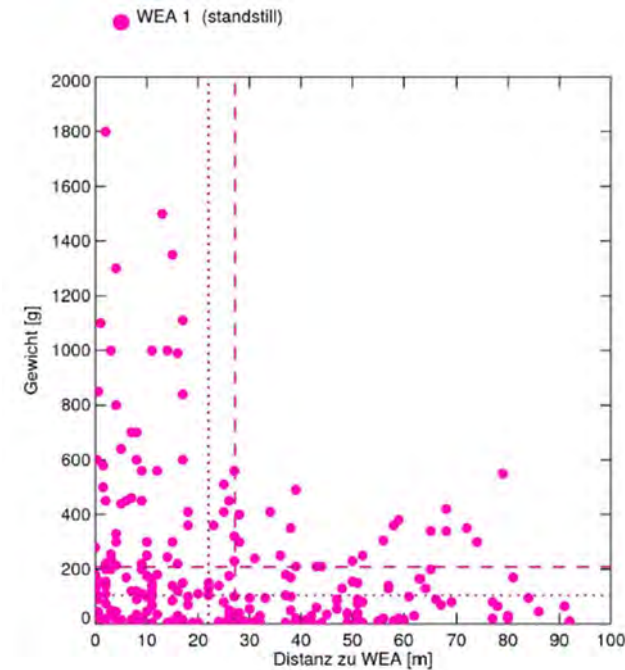
Ce graphique montre plus particulièrement que l'effet des vents dominants et la répartition asymétrique.

La rose des vents à droite [4.3.1] correspond aux conditions de vents présent lors de l'établissement du graphique ci-dessus. Le secteur 240-270 est clairement celui qui est majoritaire.



Statistique d'impact, 4 saisons (2005-9), en fonction du poids des éléments de glace [4.3.1]

Bien que les éléments lourds soient moins impactés par les forces de frottement, leurs probabilités restent faibles. En effet, une fragmentation peut se produire pendant le vol et diminue la taille des éléments.



Relation masse - distance parcourue, 4 saisons (2005-9), par les fragments de glace [4.3.1]

La complexité de ce schéma, représentatif d'une situation parmi d'autres, doit être simplifiée afin de pouvoir tirer des valeurs numériques.

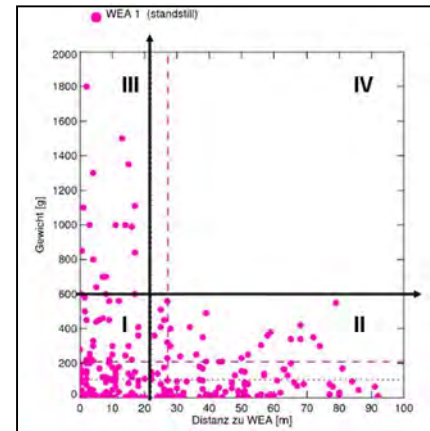
Le graphique a donc été divisé en 4 quadrants représentatifs.

I : probabilité d'impact élevée jusqu'à 20 m,
masse ≤ 0.6 kg $\Rightarrow$ 115 impacts

II : probabilité d'impact moyenne de 20 à 100 m,
masse ≤ 0.6 kg $\Rightarrow$ 93 impacts

III : probabilité d'impact faible jusqu'à 20 m,
masse > 0.6 kg $\Rightarrow$ 2 kg $\Rightarrow$ 19 impacts

IV : probabilité insignifiante de 20 à 100 m,
masse > 0.6 kg $\Rightarrow$ 2 kg $\Rightarrow$ 1 impact



[4.3.1]

Un total de 228 impacts a été relevé en cumulant 32 recherches d'impacts sur 4 saisons de givre entre 2005 et 2009.

11.1.2 Résultats d'impacts à St-Brais

Le graphique final de la relation entre la masse des éléments de glace et la distance de projection est similaire à celui de Gütsch. Toutefois, compte tenu de la taille plus grande des éoliennes de St-Brais, les distances et les masses se trouvent augmentées.

En utilisant la sectorisation en 4 quadrants sur le principe du § 11.1.1 les résultats sont les suivants :

I : probabilité d'impact élevée jusqu'à 42 m,
masse ≤ 2.1 kg $\Rightarrow$ 76 impacts moyens annuels

II : probabilité d'impact moyenne de 42 à 100 m,
masse ≤ 2.1 kg $\Rightarrow$ 27 impacts moyens annuels

III : probabilité d'impact faible jusqu'à 42 m,
masse > 2.1 kg $\Rightarrow$ 7 kg $\Rightarrow$ 3 impacts moyens annuels

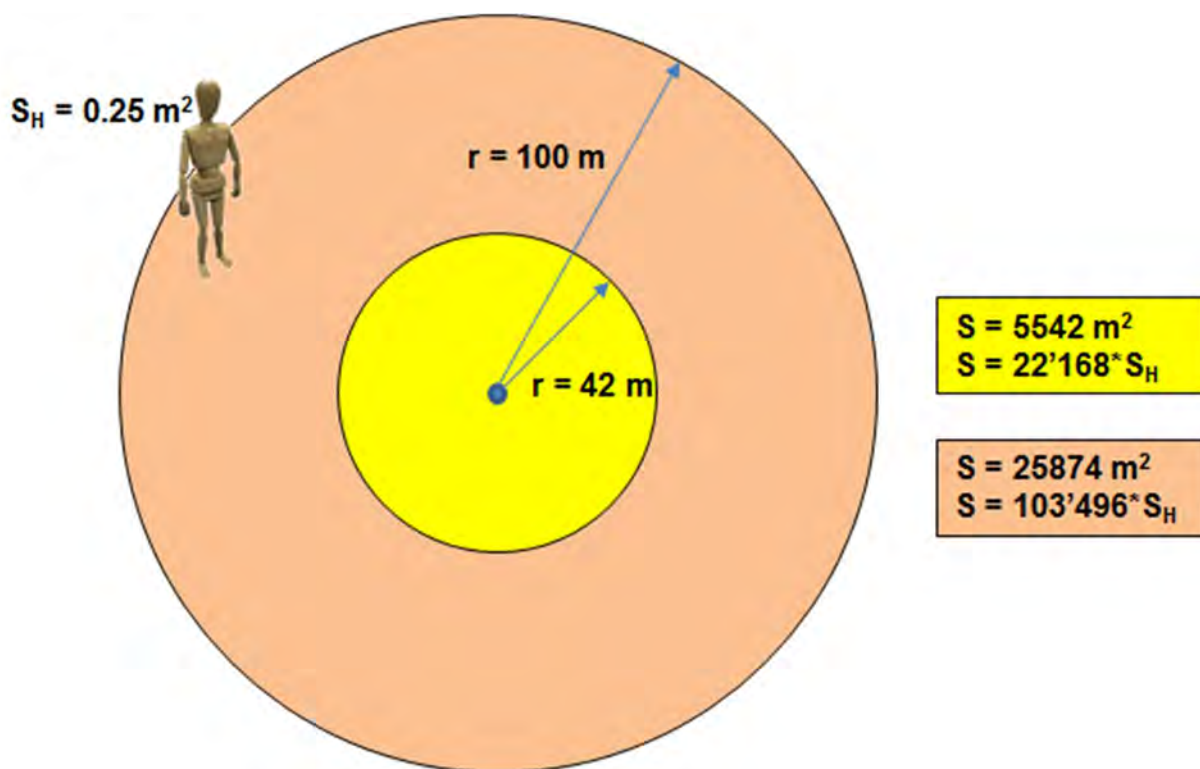
IV : probabilité très faible de 42 à 100 m,
masse > 2.1 kg $\Rightarrow$ 7 kg $\Rightarrow$ 0.2 impact moyen annuel

Un total moyens annuels de 106.2 impacts a été relevé en traitant 3 saisons (années) de givre entre 2012 et 2015.

11.1.3 Considérations concernant le total des impacts

Le rapport (Vereisung WEA St-Brais) ne permet pas de définir un nombre d'impact moyen par épisode de givrage. Il conviendrait de mettre en relation le nombre d'impact sur la durée d'une période de givre et de répéter cette analyse de terrain à plusieurs reprises et pour plusieurs éoliennes de différentes hauteurs.

Si l'on considère que pour St-Brais, 37 impacts ont été relevés pour 4 périodes de givre (intervalle de temps au sens du schéma S-9.2.1 du § 9.2), on peut approcher la probabilité d'impact par unité de surface (S_H = surface occupée par une personne debout ou assise).



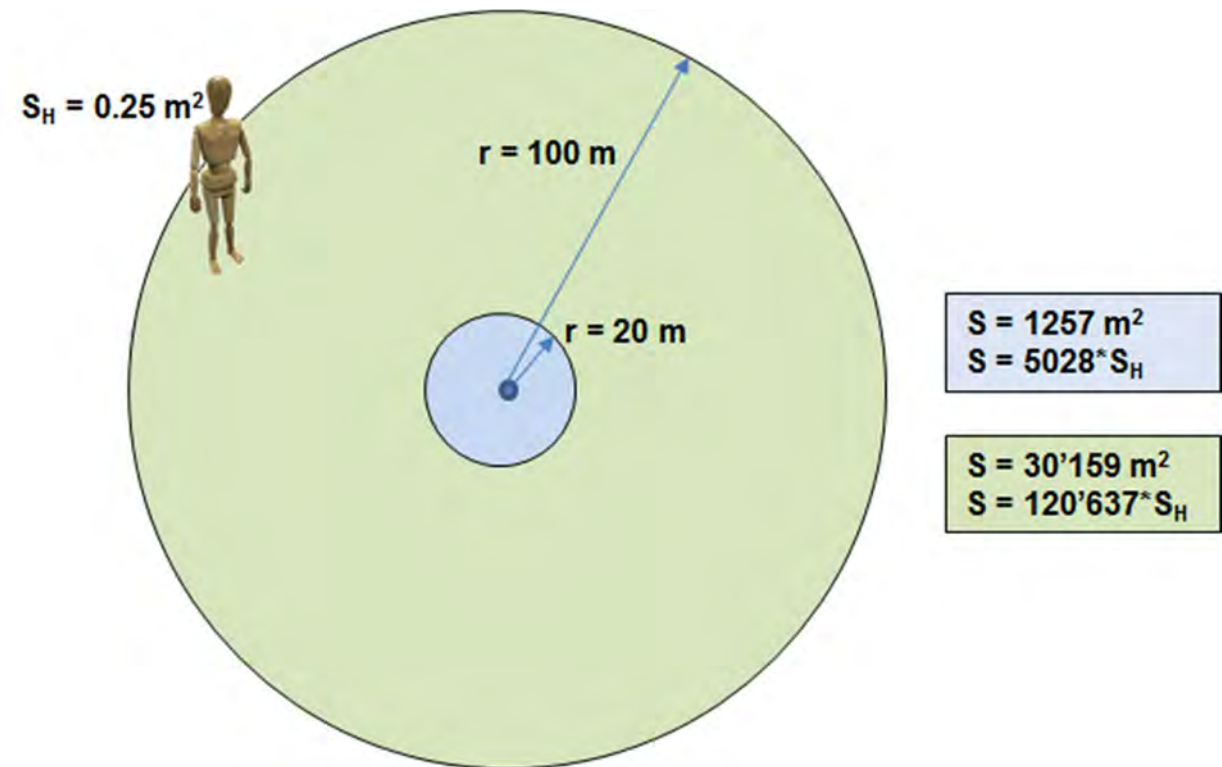
Surfaces de référence pour Enercon E82 St-Brais. (Jaune = quadrants I et III, saumon = quadrants II et IV)

L'unité de surface est celle occupée par un homme debout, soit 0.25 m². On admet qu'un morceau de glace tombant sur cette unité, si un homme s'y trouve, alors il y'a impact humain.

En reprenant le tableau des quadrants pour St-Brais, on obtient les valeurs suivantes.

Quadrant	Distance	Masse	Nb. d'impacts moy. annuels	Impacts/an/m²	Impact/an/ S_H
I	0-42 m	0-2.1 kg	76	1.4E-02	3.4E-03
II	>42-100 m	0-2.1 kg	27	1.2E-03	3.0E-04
III	0-42 m	>2.1-7.0 kg	3	5.4E-04	1.4E-04
IV	>42-100 m	>2.1-7.0 kg	0.2	9.0E-06	2.3E-06

Pour Gütsch, on obtient les valeurs suivantes.



Surfaces de référence pour Enercon E40 Gütsch. (Bleu = quadrants I et III, vert = quadrants II et IV)

Quadrant	Distance	Masse	Nb. d'impacts moy. annuels	Impacts/an/m ²	Impact/an/S _H
I	0-20 m	0-0.6 kg	28.8	1.9E-02	4.7E-03
II	>20-100 m	0-0.6 kg	23.3	7.7E-04	1.9E-04
III	0-20 m	>0.6-2.0 kg	4.8	3.8E-03	9.5E-04
IV	>20-100 m	>0.6-2.0 kg	0.3	9.9E-06	2.5E-06

Cette approche probabiliste n'est pas reliée à une notion de temps. Ce paramètre doit être déterminé par des observations en temps réel.

11.2 Temps de présence d'une personne

Une personne se déplaçant dans la zone dangereuse va avoir un certain temps de résidence en fonction de la vitesse de déplacement.

Emprise au sol d'un Homme S_H :	0.25 m ² (~0.4 m * 0.6 m)
Vitesse d'un Homme au pas (y.c. raquettes) :	4 km/h (1.1 m/s)
Vitesse d'un Homme, course :	8 km/h (2.2 m/s)
Vitesse d'un Homme, ski de fond :	12 km/h (3.3 m/s)
Vitesse d'une voiture sur chemin blanc :	20 km/h (5.6 m/s)
Durée de parcours au pas :	91 s pour 100 m
Durée de parcours, course :	45 s pour 100 m
Durée de parcours, ski de fond :	30 s pour 100 m
Durée de parcours, voiture sur chemin blanc :	18 s pour 100 m

Temps de résidence (t_R)

Le temps de résidence est la période pendant laquelle une personne se trouve dans une zone dangereuse.

Probabilité modélisée (P_{mod})

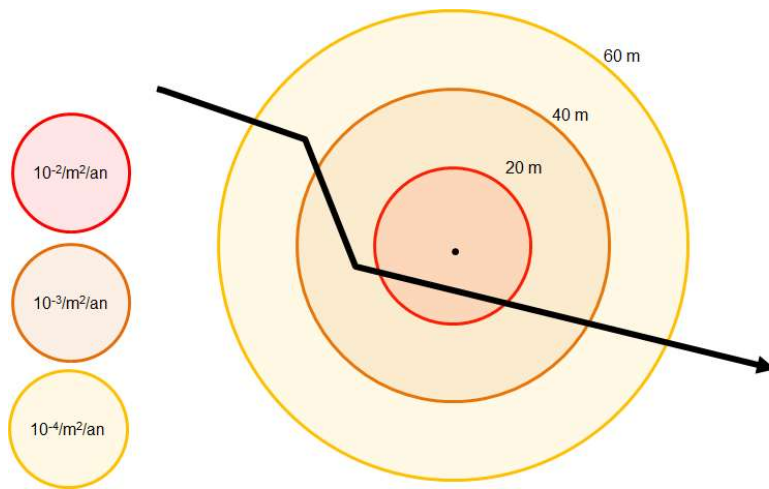
Probabilité qu'un élément de glace parviennent dans une certaine zone et en fonction des conditions météorologiques.

Probabilité d'impact pour une personne ($P_{imp/P}$)

La probabilité d'être impacté pour une personne dans la zone dangereuse est le produit de la probabilité modélisée dans la zone concernée par le temps de résidence.

$$P_{imp/P} = P_{mod} * t_R$$

Le schéma suivant illustre la notion de temps de résidence et de probabilité d'impact sur la personne.



Parcours d'une personne dans des zones de probabilité (les probabilités sont des ordres de grandeur)

La zone commence avec le cercle orange. En deçà la probabilité est considérée comme nulle. La flèche noire représente le parcours d'une personne.

Le trajet se constitue comme suit :

31 m en zone orange, 51 m en zone brune et 31 m en zone rouge.

Pour une personne au pas, les temps de résidence par zone sont les suivants :

28 s en zone orange, 46 s en zone brune et 28 s en zone rouge.

Les probabilités sont exprimées en impacts/m²/an. Pour être cohérent avec les temps de résidence, les probabilités d'impacts doivent être recalculées à la seconde.

$$1 \text{ an} = 31'536'000 \text{ secondes ou } 1 \text{ seconde} = 3.2\text{E-}08 \text{ an}$$

Donc les probabilités d'impact par m² et par seconde sont respectivement :

3.2E-12 pour la zone jaune, 3.2E-11 pour la zone orange et 3.2E-10

Finalement, la somme des probabilités est de :

$$28 \times 3.2\text{E-}12 + 46 \times 3.2\text{E-}11 + 28 \times 3.2\text{E-}10 = 1.05 \text{ E-}08$$

11.3 Calcul probabiliste final

Le principe final de calcul est donné ci-après, mais il n'est pas possible actuellement de donner des valeurs numériques relatives aux éoliennes de St-Brais et Gütsch [4.3.1], ni d'autres éoliennes faute de données en provenance du terrain.

Pour avoir une approche complète, il faut avoir les données suivantes :

Durée totale des périodes de givre

Durée moyenne d'une période de givre

Nombre d'impact moyen constaté par période de givre

Emplacement des impacts et masse des éléments de glace.

L'objectif est de convertir les données afin de calculer la probabilité par unité de surface et par saison.

$$P_{\text{imp}} = \frac{\sum \text{Impacts (pour une saison)}}{\text{Surface totale d'impact (rayon maximal)}} \quad (\text{par unité de surface et de temps})$$

La probabilité d'impact sur une personne est finalement :

$$P_{\text{imp/P}} = P_{\text{imp}} * t_R$$

La masse proprement dite des éléments de glace n'est que peu importante car les énergies engagées sont telles que des lésions sont toujours à prévoir en cas de contact direct.

11.4 Exemple de calculs

11.4.1 Scénario personne statique

Une personne qui travaille à proximité du site éolien vient manger tous les jours (230/an) au pied de l'éolienne (zone la plus dangereuses. Il y reste, y compris le bref temps de déplacement, 1h chaque jour.

Afin d'avoir un ordre de grandeur pour la surface dangereuse totale (4 quadrants), voici le résultat des calculs (tableau suivant, T-11.4.2) en fonction des zones (et quadrants) occupés.

Paramètres Gütsch	Valeurs	Référence, remarque
Quadrants I et III (distance 0 à 20 m)	⇒ 1.9E-02 I/an/m² ⇒ 3.8E-03 I/an/m²	poids ≤ 0.6 kg poids ≥ 0.6 kg
Total I et III, toutes les masses :	2.3E-02 I/an/m²	
Quadrant II et IV (distance 20-100 m)	⇒ 7.7E-04 I/an/m² ⇒ 9.9E-06 I/an/m²	poids ≤ 0.6 kg poids ≥ 0.6 kg
Total II et IV, II et IV, toutes les masses :	7.8E-04 I/an/m²	
Quadrants I-IV	1.7E-03 I/an/m²	Distance 0-100 m, toutes masses
	4.3E-04 I/an/S_H (1m ² = 4*S _H)	

T-11.4.1.1 Probabilité d'impact annuel pondéré par quadrant Gütsch

Même calculs pour le site de St-Brais ; probabilité de givre, 20 j/an.

Paramètres St-Brais	Valeur	Référence, remarque
Quadrants I et III (distance 0 à 42 m)	⇒ 6.0E-02 I/an/m² ⇒ 2.4E-03 I/an/m²	poids ≤ 2.1 kg poids ≥ 2.1 kg
Total I et III, toutes les masses :	6.3E-02 I/an/m²	
Quadrant II et IV (distance 42-100 m)	⇒ 9.0E-04 I/an/m² ⇒ 6.6E-06 I/an/m²	poids ≤ 2.1 kg poids ≥ 2.1 kg
Total II et IV, II et IV, toutes les masses :	9.1E-04 I/an/m²	
Quadrants I-IV	3.4E-03 I/an/m²	Distance 0-100 m, toutes masses
	8.5E-04 I/an/S_H (1m ² = 4*S _H)	

T-11.4.1.2 Probabilité d'impact annuel pondéré par quadrant St-Brais

A partir des résultats des cases vertes, probabilité d'impact par surface relative d'un Homme, on peut calculer pour le scénario statique, la nouvelle probabilité d'impact annuel.

$$I/an/S_H / 8760 \text{ h} * 230 \text{ j} * 1 \text{ h} = I \text{ scénario}$$

Scénario statique	Gütsch	St-Brais
$I/an/S_H$	4.3E-04	8.5E-04
I scénario	1.1E-05	2.2E-05

T-11.4.1.3 Probabilité d'impact scénario statique

11.4.2 Scénario dynamique

Un travailleur traverse le site éolien tous les jours (230/an), en passant par la base de l'éolienne, pour aller de son domicile à son lieu de travail et au retour. Le travailleur se déplace au pas (4 km/h, § 11.2).

Longueur du site : 200 m (2x/j)

Vitesse du travailleur : 4 km/h = 1.1 m/s

Durée d'un passage : 200 m / 1.1 m/s = 182 s

Nombre de passage : 230 * 2/j * 182 s = 83720 s = 23h15

$$I/an/S_H / 8760 \text{ h} * 23\text{h}15 = I \text{ scénario}$$

Scénario dynamique	Gütsch	St-Brais
$I/an/S_H$	4.3E-04	8.5E-04
I scénario	1.1E-06	2.3E-06

T-11.4.2.1 Probabilité d'impact scénario dynamique

11.4.3 Résumé des scénarios

Le tableau suivant résume les probabilités d'avoir un impact de glace sur une personne. Les conséquences de l'impact ne sont pas définies (tous les impacts : sans conséquences, avec blessure ou décès).

	Gütsch		St-Brais	
	Probabilité annuelle	Survenance tous les ...	Probabilité annuelle	Survenance tous les ...
I/an/S_H	4.3E-04	-	8.5E-04	-
I scénario statique	1.1E-05	90'909 ans	2.2E-05	45'455 ans
I scénario dynamique	1.1E-06	909'090 ans	2.3E-06	434783 ans

T-11.4.3.1 Probabilité d'impact scénarios statiques et dynamique

11.4.4 Résumé des hypothèses

Les résultats semblent particulièrement élevés au § 11.4.3. Toutefois, il convient de prendre en compte que chaque choix d'hypothèse s'est porté sur la plus pénalisante.

- Hypothèse no 1 : §4.1, les classes de fréquences de givre ont été regroupées par 2 pour simplifier les calculs / facteur d'erreur possible 20%
- Hypothèse no 2 : §4.2, tous les types de glace sont considéré comme dangereux / facteur d'erreur possible 20%
- Hypothèse no 3 : §9.5.3, tous les impacts avec une personne provoquent des conséquences humaines / facteur d'erreur possible 20%
- Hypothèse no 4 : §11.1.1 et 11.1.2, les hivers retenus ont été particulièrement propices au givre / facteur d'erreur possible 20%
- Hypothèse no 5 : §11.1.3, la surface d'un homme a été considérée à 0.25 m², une tête (organe le plus sensible à l'impact) avoisine 0.125 m² / facteur d'erreur possible 20%
- Hypothèse no 6 : §11.4.1, on considère que la personne s'expose pendant les périodes dangereuses, sans considérer le danger et sans réflexion / facteur d'erreur possible 20%

Au final, nous avons donc défini une probabilité extrême. La réalité donnerait plutôt des valeurs 5-10 fois inférieures. Cet ordre de grandeur est similaire à celui décrit dans le Wind Energy Handbook [11.4.4.1].

12 Comparaison avec d'autres risques

12.1 Statistiques du BPA

En prenant les documents statistiques du BPA [12.1.1] on obtient le tableau suivant :

Paramètres	2010	2011	2012	2013
Population CH au 01.01 de l'année	7'783'000	7'870'134	7'954'662	8'039'060
Croissance population pendant l'année	+1.1%	+1.1%	+1.0%	+1.3%
Décès, circulation routière	306	296	285	247
Décès, activités Sportives	116	143	100	124
- ski, ski randonnée, snowboard	?	22	16	?
- randonnée, randonnée alpine	?	52	28	?
Habitat et loisirs	1734	1821	1881	2012
Total des décès	2156	2260	2266	2383
Augmentation des décès	Année référence	+4.8 % réf. 2010	+0.2 % réf. 2011	+5.2 % réf. 2012

T-12.1.1 Statistique des décès [12.1.1]

Il nous paraissait intéressant d'ajouter une statistique complète des sports de neige et de randonnée.

Groupe de sports / sport	Suisse			Etranger			Total		
	Hommes	Femmes	Total	Hommes	Femmes	Total	Hommes	Femmes	Total
Sports de montagne									
Randonnée en montagne	27	10	37	10	2	12	37	12	49
Alpinisme	6	2	7	16	2	18	22	4	25
Escalade	3	1	4	1	0	1	4	1	5
Canyoning	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Total sports de montagne	36	13	49	27	4	31	63	17	80
Sports d'hiver									
Ski de randonnée	11	2	13	5	1	6	16	3	19
Ski hors-piste	3	0	3	3	1	4	6	1	7
Ski alpin	3	1	4	1	0	1	4	1	5
Raquette	1	0	1	1	1	2	2	1	3
Snowboard hors-piste	1	0	1	2	0	2	3	0	3
Luge	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Snowboard	0	1	1	0	0	0	0	1	1
Ski de fond	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Total sports d'hiver	21	4	25	12	3	15	33	7	40

T-12.1.2 Statistiques des décès, périodes cumulées 2009-2013

12.2 Statistiques de la SUVA

Sur notre requête, la SUVA nous a relaté environ 15 cas relevant de la LAA dus à des chutes de neige d'un toit entre 2005 et 2014. Soit en moyenne, 1.5 cas par an.

12.3 Autres statistiques

Malgré de nombreuses demandes dans les agences d'assurance, il n'a pas été possible d'obtenir de statistiques probantes concernant les cas d'accident avec chute de neige de toiture.

12.4 Utilisation de véhicule à moteur

A titre de comparaison, il y'a 0.34 tués pour 100'000'000 de kilomètres parcourus. Ce qui représente : $3.4E-09$ par kilomètre.

Ce qui représente pour un voyageur de commerce (100'000 km/an, une probabilité de $3.4E-04$) et pour un conducteur moyen (10'000 km/an, une probabilité de $3.4E-05$).

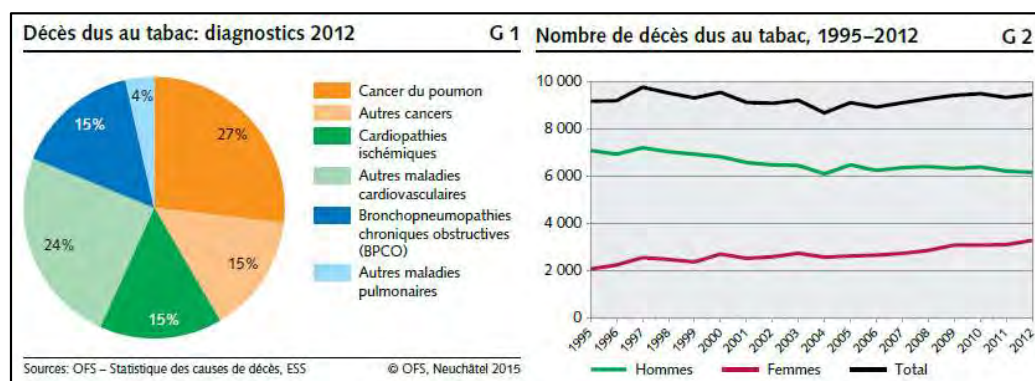
	Utilisation d'une voiture	
Conducteur moyen	3.4E-05	29'411 ans
Voyageur de commerce	3.4E-04	2941 ans

1 repas d'une heure sous une éolienne à St-Brais représente 28.5 km de voiture.

T-12.4.1 Comparaison de scénarios

12.5 Tabagisme en Suisse

Le tabagisme en Suisse est une cause importante de mortalité. L'OFS a publié une statistique de 1995 à 2012 [12.5.1]. 9500 décès sont considérés comme dus au tabac en 2012



T-12.5.1 : tabagisme en Suisse, décès

12.6 Synthèse des statistiques

Finalement en reprenant les tableaux du BPA T-12.1.1 et T-12.1.2, on obtient une bonne comparaison des risques.

		Probabilité annuelle	Survenance tous les ...
I scénario statique St-Brais		2.2E-05	45'455 ans
2010	Circulation routière	3.9E-05	25'434 ans
	Activité sportive	1.5E-05	67'095 ans
	Habitat et loisirs	2.2E-04	4'488 ans
2011	Circulation routière	3.8E-05	26'588 ans
	Activité sportive	1.8E-05	55'036 ans
	- ski, ski randonnée, snowboard	2.8E-06	357'733 ans
	- randonnée, randonnée alpine	6.6E-06	151'349 ans
	Habitat et loisirs	2.3E-04	4'322 ans
2012	Circulation routière	3.5E-05	27'911 ans
	Activité sportive	1.3E-05	79'547 ans
	- ski, ski randonnée, snowboard	2.0E-06	497'166 ans
	- randonnée, randonnée alpine	3.5E-06	284'095 ans
	Habitat et loisirs	2.4E-04	4'229 ans
	Tabagisme	1.2E-03	837 ans
2013	Circulation routière	3.1E-05	32'547 ans
	Activité sportive	1.5E-05	64'831 ans
	Habitat et loisirs	2.5E-04	3'996 ans

T-12.6.1 : probabilité de décès de différentes activités

13 Discussion des résultats

13.1 Statistiques et analyse de risque

Les probabilités d'impact diminuent rapidement avec l'éloignement. A contrario les effets de l'impact ne sont pas directement liés à l'éloignement de l'éolienne. Un élément de petite taille à forte vitesse (et distance élevée) peut transmettre la même énergie qu'un élément plus gros, plus lent (à distance plus courte).

La masse des éléments pris en considération est problématique de manière quasi systématique dès 100 g. Ainsi, l'importance de définir les tailles des éléments de glace passe en second plan.

Les valeurs calculées au § 11.4.1 montre que les probabilités d'être touché par un morceau de glace reste extrêmement rare, mais la multiplication des éoliennes en nombre et en taille va clairement augmenter la probabilité d'impact. A contrario, de nouvelles mesures de sécurité sont développées et limitent, ainsi, la corrélation avec le nombre d'éoliennes.

La poursuite des campagnes de comptage des éléments de glace, du développement des mesures de limitation de l'accrétion de glace, des mesures de sécurité, ... est réalité et une nécessité. Les statistiques s'affineront à mesure que les campagnes de comptage augmenteront.

Les résultats montrent que les ordres de grandeurs obtenus dans d'autres études sont similaires.

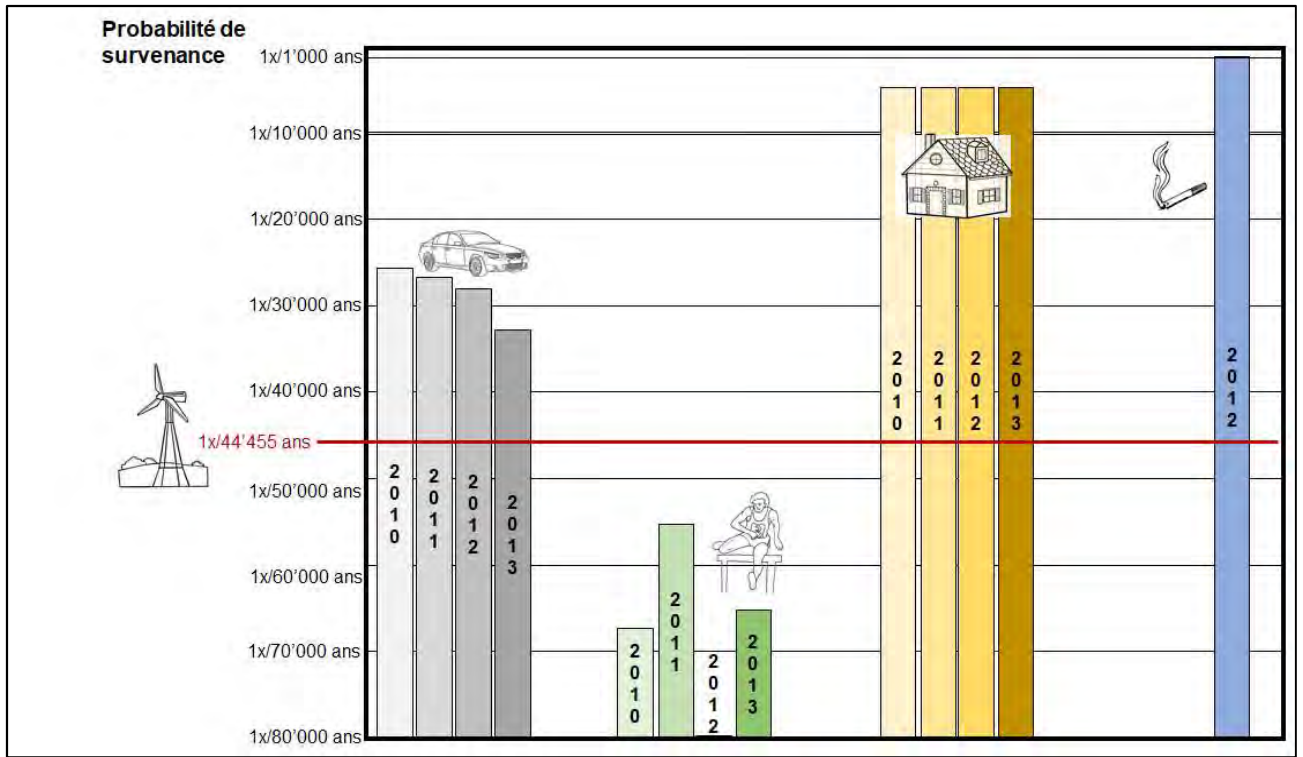
Le § 11.4.4 est particulièrement important car il montre les incertitudes qui ont émaillé ce rapport. Bien que l'on parle d'un ordre de grandeur, il faut rappeler que c'est les hypothèses les plus péjoratives qui ont été prises en compte comme dans les analyses de risques selon OPAM.

Comme toutes les statistiques et les calculs, il faut prendre les résultats avec les précautions et le recul indispensable. Les résultats obtenus sont limités à 2 sites et pour une période de 3-5 ans. Il convient de travailler l'analyse de risque pour l'adapter à chacun des sites en fonction de ses propres données locales.

En regard du paragraphe 12.6, les probabilités d'accidents et de décès de la vie de tous les jours sont supérieures (accident domestique et de loisir, circulation routière et tabagisme) à ceux générés par les éoliennes. A contrario, la probabilité d'accidents dus au sport sont moins élevés. Il faut toutefois prendre en compte que les personnes exposées aux éoliennes sont largement moins nombreuses que celles pratiquant un sport. Ainsi, les accidents d'éoliennes restent extrêmement rares.

La probabilité de décès par le tabagisme est environ 50 fois plus grande, 10 fois plus grand dans le cadre domestique, 1.6 fois plus grand sur route et 1.5 fois moins grand pour le sport.

Le tableau ci-après résume ces probabilités.



T-13.1 : probabilité de décès... circulation routière sport maison, loisirs tabagisme

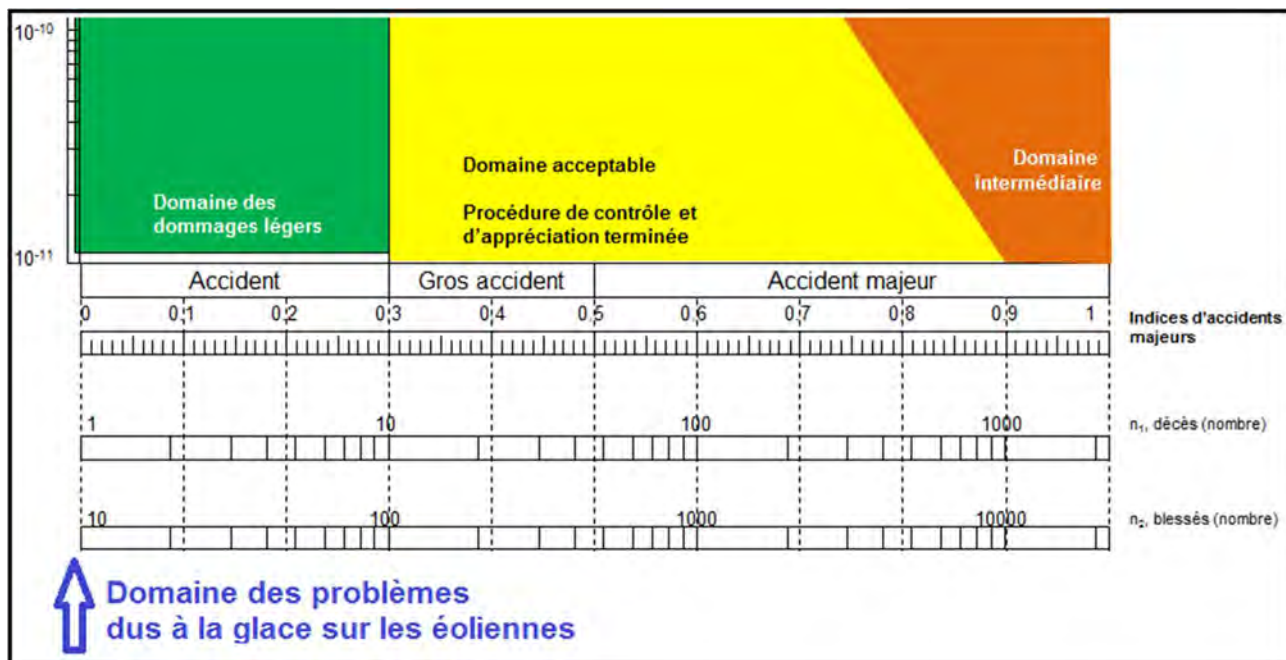
13.2 Modélisations Météotest

Les résultats des modélisations sont difficiles à mettre en relation avec les résultats observés sur le terrain. En effet, la quantité de résultats de terrains est faible par rapport aux nombres d'impacts modélisables. En l'état, la réalité des modélisations (et des modèles) ne peut être ni confirmée, ni infirmée. Pour cela, il faudrait un nombre d'impacts observés sur le terrain beaucoup plus élevé.

Le développement de la modélisation doit être poursuivi de concert car il représente, à terme, un outil précieux de définition des zones à prendre en compte.

14 Conclusions

Au départ, il était souhaité avoir une analyse similaire au principe de l'OPAM et sa matrice probabilité/conséquence. Mais au vu de cette dernière, nous pouvons conclure que cette matrice n'est pas adaptée (toutes les conséquences dues à la glace sont en deçà du domaine d'analyse).



De plus, compte tenu de la spécificité de chaque site, emplacement, type d'éolienne, météorologie locale, etc., il n'est pas possible de présenter un diagramme papillon, et une matrice au sens de l'OPAM, qui soit directement applicable. Sur le principe ceci serait possible, mais l'aspect quantitatif est trop complexe et diverge par trop d'un site à l'autre.

Le diagramme papillon qui a été présenté permet de mettre en évidence les paramètres clefs de l'évaluation du risque de givre sur un site éolien donné.

Il est clair que le comportement des personnes sur site et du respect des consignes données est très aléatoire. Il peut y avoir des dizaines de personnes qui renoncent à passer dans la zone dangereuse, abaissant ainsi fortement la probabilité d'impact sur une personne, comme un groupe scolaire mal encadré ne respectant pas les consignes données peut créer une probabilité très élevée.

Ce rapport peut finalement être un argumentaire pour démontrer que les sites éoliens sont des zones dangereuses, au même titre qu'une forêt en pleine tempête ou sous un pylône électrique de grande hauteur (glace). L'abondante littérature montre que le phénomène de givre est largement pris en compte, mais les statistiques sont encore rare dans ce domaine particulier car les cas ont été, fort heureusement, très rares à ce jour.

Les éléments mis en avant dans les différents chapitres permettent de mettre en place une méthodologie d'évaluation du risque pour les différents sites, chacun d'eux devant être étudié individuellement.

Les conditions de givres des éoliennes sont clairement connues. Sachant que ces conditions ne sont pas propices à la randonnée pédestre ou à ski, la probabilité de présence de personnes est restreinte, ce qui diminue les probabilités calculées puisque nous avons pris en considération des expositions de fréquences identiques, avec ou sans conditions de givre.

Finalement, le marquage du site (comme présenté à l'annexe 1) est une mesure utile et efficace.

Swissi SA

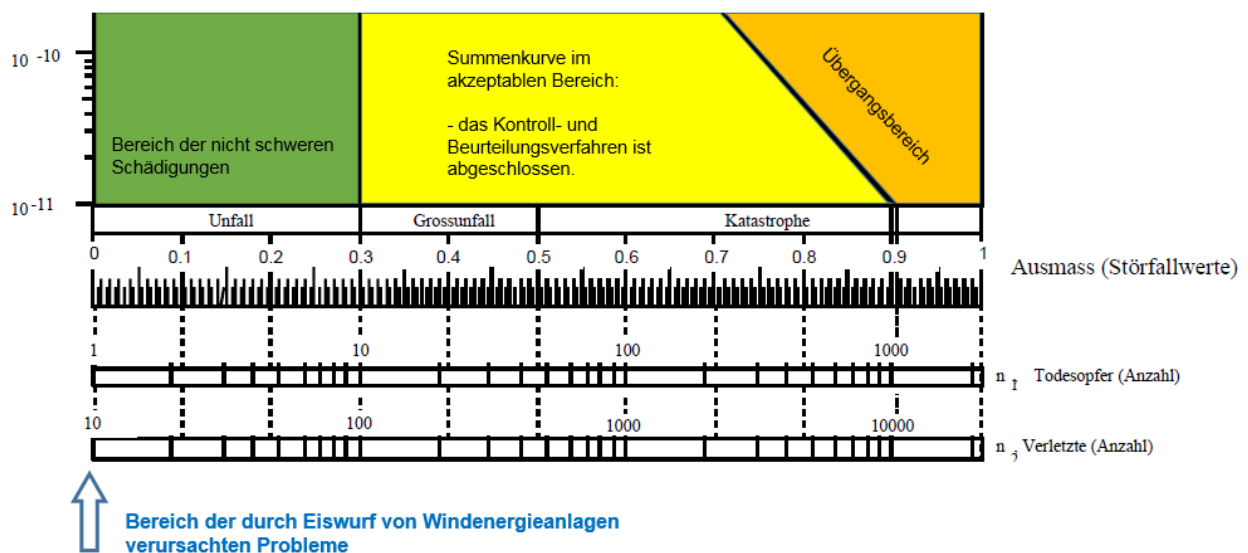
Roland Stucki
Membre de la direction



Dr Jean-Marc Vaucher
Chimiste

15 Schlussfolgerungen

Zu Beginn der Arbeiten war geplant, eine Risikoanalyse gemäss den Prinzipien der Störfallverordnung StFV und des in der entsprechenden Richtlinie (Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung, BAFU, 2001) enthaltenen Risikobeurteilungsdiagramms durchzuführen. Betrachtet man aber dieses Diagramm, so zeigt sich, dass es nicht für die Beurteilung des Eiswafrisikos von Windenergieanlagen herangezogen werden kann, weil das Ausmass aller Eiswauf-Störfälle unterhalb der in der Richtlinie behandelten Schäden liegt:



W-A-Diagramm mit Kriterien zur Beurteilung des Risikos, aus: Richtlinien, Beurteilungskriterien II zur Störfallverordnung, BAFU, 2001

Zieht man ausserdem die Eigenschaften der einzelnen Standorte, Windenergieanlagen, lokalen Wetterverhältnisse, etc. in Betracht, so ist es nicht möglich, ein Ursache-Wirkungs-Diagramm und eine Risikobeurteilung im Sinne der Störfallverordnung zu präsentieren, welche direkt anwendbar wären. Was im Grundsatz zwar möglich erscheint, ist in der Realität quantitativ zu komplex und von Einzelfall zu Einzelfall zu unterschiedlich.

Das im Bericht vorgestellte Ursache-Wirkungs-Diagramm ermöglicht aber die Identifikation der Schlüsselparameter für die Analyse des Eiswauf-Risikos einer konkreten Windenergieanlage oder Windparks.

Es ist klar, dass sich das Verhalten von Personen, welche sich in der Nähe der Windenergieanlagen aufhalten und die Art, wie sie allfällige Vorschriften und Hinweise beachten, nicht vorhersagen lässt. So könnten z.B. einige Dutzend Personen die Gefahrenzone umgehen und damit die Wahrscheinlichkeit des Einwirkens auf eine Person deutlich reduzieren. Ebenso kann eine unbegleitete Schulklasse, die ein Gefahrensignal missachtet, eine erhöhte Schadenswahrscheinlichkeit kreieren.

Dieser Bericht soll als Argumentarium dienen um zu zeigen, dass Windparks ebensolche Gefahrenzonen sein können wie Wälder während eines Sturms oder die Zone unterhalb von vereisten Hochspannungsleitungen. Die reichlich vorhandene Literatur zeigt, dass die Gefahr des Eiswaufs in aller Regel berücksichtigt wird. Die Statistiken dazu stehen allerdings auf schwachen Füßen, da es glücklicherweise bisher nur sehr wenige Schadensereignisse gab.

Die in den verschiedenen Kapiteln vorgestellten Elemente erlauben es, eine Methodologie für die Risikoevaluation betreffend Eiswurf für verschiedene Standorte aufzustellen/ zu entwickeln, wobei jeder Standort individuell analysiert werden muss.

Es ist sehr gut bekannt, unter welchen Wetterbedingungen an den Rotorblättern einer Windenergieanlage Eis entstehen kann, und diese Bedingungen laden nicht zum Spazieren oder Sport im Freien ein. Unter Vereisungsbedingungen ist somit die Wahrscheinlichkeit, dass sich Personen in der Nähe der Windenergieanlagen aufhalten, geringer als im Normalfall, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Schadensfällen verringert wird. Da der Bericht bei der Präsenz von Personen keinen Unterschied zwischen gutem und schlechtem Wetter gemacht hat, sind die tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten für Schadensfälle kleiner als im Bericht angegeben.

Schliesslich beurteilen wir die Signalisation von Gefahrenstellen (Beispiele siehe Anhang 1) als nützliche und effiziente Massnahme.

15 Abréviations

a	accélération
BPA	Bureau de Prévention des Accident
BFU	BPA
CWIF	
D	diamètre du rotor
d	distance
d _r	distance de projection rotor tournant
d _s	distance de projection rotor arrêté
E	énergie
EB	étude de base
E _{cin}	énergie cinétique
EN	European norme, norme européenne
E _{pot}	énergie potentielle
F	force
ICP	intracranial pressure (pression intracraniale)
g	gravité terrestre (9.81 m/s ²) ou gramme
GW	gigawatt (1 milliard de watt)
H	hauteur de la nacelle
h	hauteur de chute ou heure
I	impact
ISO	International Organization for Standardization, organisation internationale de normalisation
J	joule, unité de puissance
kg	kilogramme
kJ	mille joules
LTC	Low temperature climate, climat basse température
m	masse ou mètre
MW	mégawatt (1 million de watt)
OACI	ordonnance sur l'aviation civile
OFE/OFEN	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
OPAM	ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs
P	probabilité
P _{imp}	probabilité d'impact

$P_{imp/P}$	probabilité d'impact pour une personne
P_{mod}	probabilité obtenue par modélisation
P_p	périmètre décrit par l'extrémité de la pale
PAFF	plan d'affectation
PDir	planification directe
r	rayon du rotor, distance moyeu-extrémité de pale
S	surface
S_H	surface occupée par un homme debout ou assis
SUVA	caisse nationale d'assurance
t_a	température d'accrétion
t_r	temps de résidence
TCC	traumatisme cranio cervical
v	vitesse du vent au niveau de la nacelle ou vitesse en général
W	watt, unité d'énergie
WEA	Wind Energie Anlage
ν	fréquence de rotation du rotor
ν_G	fréquence de givrage
ν_{GH}	fréquence de présence d'une personne pendant la période de givrage
ν_H	fréquence de présence d'une personne
Σ	somme
$^{\circ}\text{C}$	degré Celsius
$^{\circ}\text{F}$	degré Fahrenheit

16 Bibliographie

- [2.1.1] Suisse-Eole.
<http://www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/>
- [2.1.2] Global Wind Energy Council (GWEC).
<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>
- [2.2.1] Caithness Windfarm Information Forum (CWIF).
<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm>
- [2.3.1] Volkswind, Etude de dangers du projet éolien du Mont-de-Trême, Communes de Guerbigny, Erches et Warsy (F), 2012.
- [2.4.1] Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs, RS 814.012, 27.02.1991 (état au 01.06.2015), Confédération Suisse.
- [3.1.1] W. Ott, Y. Kaufmann, P. Steiner, K. Gilgen, A. Sartoris, Eoliennes en Suisse, Bases de planification pour l'aménagement du territoire et effets, Office fédéral de l'énergie, Berne (CH), 2008.
- [3.2.1] Office fédéral de l'énergie (énergie éolienne).
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00500/index.html?lang=fr>
- [3.2.2] Guide pour l'optimisation des pratiques de planification des parcs éoliens, Office fédéral de l'énergie, Berne (CH), 2016.
- [4.1.1] Vereisungskarte der Schweiz, Office fédéral de l'énergie, Berne (CH), 2010.
- [4.1.2] Suisse Eole
<http://wind-data.ch/windkarte/vereisung.php>
- [4.2.1] R. Cattin et al., Wind turbine ice throw studies in the swiss alps, Meteotest, Berne (CH), 2007.
- [4.2.2] H. Seifert et al., Risk analysis of ice throw from wind turbines, Deutsche Windenergie-Institut, Wilhelmshaven (D), 2003.
- [4.3.1] Vereisung WEA St. Brais, Office fédéral de l'énergie, Berne (CH), 2013.
- [4.4.1] Development of wind turbines for safe operation in alpine environments, Office fédéral de l'énergie, Berne (CH) 2009.
- [5.2.1] WindPower, modèle Vesta 126
http://www.thewindpower.net/turbine_en_1100_vestas_3450.php
- [5.2.2] WindPower, modèle Enercon 82
http://www.thewindpower.net/turbine_en_6_enercon_2000.php

- [6.1] Wind Power Monthly Magazine, 01.04.1994
<http://www.windpowermonthly.com/article/956594/windsmith-death>
- [7.1] Joakim Renström, Modelling of ice throws from wind turbines, Uppsala Universitet (SWE), 2015.
- [7.2] Erik Rindeskär, Modelling of icing for wind farms in cold climate, Uppsala Universitet (SWE), 2010.
- [7.3] ISO 12494:2012, Atmospheric icing of structures, Ethiopian Standard Agency, (ETH), 2012.
- [9.2.1] IEA Wind, Wind energy projects in cold climates, 2ème éd., International Energy Agency, 2016.
- [9.5.3.1] A. Oukara et al., Injury risk assessment of non-lethal projectile head impacts, The open biomedical engineering journal, (USA), 2014.
- [9.6.2.1] International Standard, ISO 3537, 3ème éd., 1999.
- [11.1] G.A. Ruff et B. M. Berkowitz, Users manual for the NASA Lewis Ice Accretion Prediction Code (LEWICE), Ohio (USA), 1990.
- [12.1.1] Statistique des accidents non professionnels et du niveau de sécurité en Suisse, BPA, Berne (CH), 2014.
- [13.1.1] Shahram Farhadi, Preventing Corrosion and Ice Accretion on Aluminium Surfaces Applying Organic and Inorganic Thin Films, Université du Québec, Chicoutimi (CAN), 2010.
- [13.1.2] David Quéré, Les surfaces super-hydrphobes, CNRS, Paris (F), 2005.
- [13.1.3] T. Laakso et al., State-of-the-art of wind energy in cold climates, VTT Technocal Research Center of Finland, 2010.
- [13.4.1] Législation française, Arrêté du 26 août 2011 [13.4.1] relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement, JORF n°0198 du 27 août 2011 page 14539 texte n° 14, (F), 2011.
- [13.4.2] Administration fédérale Suisse, portail des dangers naturels.
<http://www.dangers-naturels.ch/home/gestion-des-dangers-naturels/vent/pendant-un-vent-fort.html>
- [11.4.4.1] T. Burton et al., Wind Energy Handbook, John Wiley and Sons, Chichester (GB), 2001.
- [12.5.1] Actualités OFS, Les décès dus au tabac en Suisse entre 1995 et 2012, Neuchâtel (CH), oct. 2015.

Annexe 1 - Signalisation du danger de givrage des éoliennes

Quelques exemples de panneaux de signalisation trouvés sur internet.



Crédit photographique : Protégons Taillard



Crédit photographique : Association du Haut-Forez





Crédit photographique : Préfecture de la Haute Loire



Crédit photographique : <http://www.voisinedeoliennesindustrielles.com/>