



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

ETAT DES CONNAISSANCES, DES PRATIQUES ET PRECONISATIONS CONCERNANT LES AGRESSIONS VENT ET NEIGE SUR LES INSTALLATIONS NUCLEAIRES DE BASE

GROUPE DE TRAVAIL « VENT ET NEIGE »

Ce rapport a été élaboré conjointement par les membres du groupe de travail « Vent et Neige » : IRSN, ANDRA, CEA, EDF, FRAMATOME, ORANO et experts issus des organismes suivants : Baudin Châteauneuf, CSTB, CTICM, INRAE, Météo France, ONERA, RTE ainsi que M. Jacques Biétry (Ingénieur général des Ponts et Chaussées et retraité du CSTB) et Keraunos.



TABLE DES MATIÈRES

1. PERIMETRE ET OBJECTIFS	10
1.1. Cadrage issu du GT Agressions externes	10
1.2. Aléas traités dans le cadre du GT Vent et Neige.....	11
1.3. Liens entre aléas et effets	12
1.4. Autres éléments de contexte des travaux du GT.....	14
1.4.1. Place des Eurocodes dans les travaux du GT et plan du rapport	14
1.4.2. Objectifs et démarche de prise en compte du changement climatique	15
2. PHENOMENES ET DONNEES DISPONIBLES.....	15
2.1. Vents	15
2.1.1. Phénomènes et conditions météorologiques.....	15
2.1.2. Vent violent et changement climatique	21
2.1.3. Observations et produits d'analyses	23
2.1.4. Conclusion et préconisation sur les données de vent à prendre en compte pour la caractérisation des vents violents	30
2.2. Neige	30
2.2.1. Phénomènes et conditions météorologiques.....	30
2.2.2. Neige et changement climatique.....	35
2.2.3. Observations et produits d'analyse	37
2.2.4. Conclusion sur les données de neige à prendre en compte pour la caractérisation de la neige	43
2.3. Combinaisons possibles de phénomènes naturels	43
3. PRISE EN COMPTE DES AGRESSIONS VENT ET NEIGE SUR LES STRUCTURES DE GENIE CIVIL.....	45
3.1. Exigences de comportement des structures	45
3.1.1. Exigences traitées par les Eurocodes.....	46
3.1.2. Exigences définies dans le référentiel CEA	48
3.1.3. Exigences définies dans le référentiel ORANO	48
3.1.4. Exigences définies dans le référentiel EDF	49
3.1.5. Exigences définies dans le référentiel FRAMATOME	50
3.1.6. Exigences définies dans le référentiel ANDRA.....	50
3.1.7. Conclusion.....	50
3.2. Principes des Eurocodes	51
3.2.1. Principes généraux des Eurocodes	51
3.2.2. Combinaison d'actions.....	54
3.3. Combinaisons d'actions accidentelles pour le vent et la neige	57
3.3.1. Pratiques actuelles des exploitants nucléaires.....	57
3.3.2. Conclusions et préconisations	60

4.	VENT : CARACTERISATION DE L’ALEA ET EFFETS	60
4.1.	Traitement statistique des vents extrêmes.....	60
4.1.1.	Objectif	61
4.1.2.	Principales études recensées par le GT	61
4.1.3.	Bonnes pratiques de traitement statistique des données de vent	61
4.1.4.	Autres approches statistiques identifiées par le GT	64
4.1.5.	Approches retenues à l’international	67
4.1.6.	Conclusions et préconisations du GT.....	68
4.2.	Majoration permettant d’atteindre la cible WENRA	69
4.3.	Démarche Eurocode pour l’étude des effets du vent sur les structures de génie civil	71
4.3.1.	Valeur de base de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$	72
4.3.2.	Vitesse de référence du vent v_b :	73
4.3.3.	Vitesse moyenne v_m	73
4.3.4.	Intensité de turbulence du vent I_v	75
4.3.5.	Pression dynamique de pointe q_p	75
4.3.6.	Actions du vent sur les structures	76
4.3.7.	Pressions et forces engendrées par le vent turbulent.....	77
4.3.8.	Détachement tourbillonnaire et instabilités aéroélastiques.....	83
4.4.	Approches alternatives ou complémentaires à l’Eurocode pour l’étude des effets du vents sur les structures	85
4.4.1.	Simulation numérique CFD	86
4.4.2.	Simulation physique à échelle réduite	94
4.5.	Schéma de synthèse	101
4.6.	Effets indirects (projectiles)	103
4.6.1.	Référentiel EDF	103
4.6.2.	Référentiel ORANO	104
4.6.3.	Projectiles retenus par l’ANDRA, Framatome et le CEA	105
4.6.4.	Projectiles retenus pour la prise en compte des effets des tornades	105
4.6.5.	Pratiques internationales et synthèse de pratiques recensées dans différents cadres	106
4.6.6.	Synthèse et préconisations.....	108
4.7.	Effets sur les ventilations	110
4.7.1.	Effets de survitesse sur la ventilation	110
4.7.2.	Obturation des ventilations	112
4.7.3.	Impact sur le confinement.....	114
4.7.4.	Synthèse et préconisations.....	117
4.8.	Autres effets (MDTE, isolement du site...)	117
4.8.1.	Manque de tension externe	117
4.8.2.	Isolement du site	118
4.8.3.	Perte de la source froide	120
4.8.4.	Travaux en extérieur – Transports internes	120
4.9.	Spécificité des rafales convectives	122

4.9.1.	Caractérisation du phénomène	122
4.9.2.	Spécificité des rafales convectives sur les bâtiments et structures	125
4.9.3.	Pratiques internationales	126
4.9.4.	Conclusion.....	126
5.	NEIGE : CARACTERISATION DE L’ALEA ET EFFETS	126
5.1.	Traitement statistique pour la neige	127
5.2.	Approche retenue par l’Eurocode pour déterminer des charges de neige sur le sol.....	129
5.2.1.	Carte des charges de neige au sol	129
5.2.2.	Information sur le poids volumique moyen de la neige	131
5.3.	Travaux de recherche à partir de simulations climatiques.....	134
5.4.	Bilan des options possibles pour atteindre la cible WENRA	135
5.4.1.	Paramètres physiques à quantifier	135
5.4.2.	Inventaire des méthodes	135
5.4.3.	Conclusion / préconisations	137
5.5.	Effet direct de chargement de la neige sur les structures	139
5.5.1.	Charges de neiges sur les constructions selon l’Eurocode 1-3	139
5.5.2.	Prise en compte des conditions des accumulations exceptionnelles.....	144
5.5.3.	Effets non pris en compte dans les Eurocodes	146
5.6.	Effet d’obstruction	146
5.6.1.	Description.....	146
5.6.2.	État des lieux des pratiques des exploitants	146
5.6.3.	Synthèse/Préconisation	148
5.7.	Autres effets	148
5.7.1.	Manque de Tension Externe.....	148
5.7.2.	Isolement du site	149
5.7.3.	Transports internes et travaux en extérieur.....	151
5.7.4.	Effets associés au verglas, à la pluie verglaçante et au givre	151
5.8.	Conclusion / préconisations.....	151
6.	RÉFÉRENCES.....	153
7.	GLOSSAIRE DES NOTIONS ET NOTATIONS DES EUROCODES	159
ANNEXES	164	

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1 : Représentation des étapes d'évaluation des charges de neige et de vent [14] (inspiré de Davenport Wind Loading Chain)	14
Figure 2 : Profils de vents moyens en fonction de la hauteur pour différentes valeurs de rugosité du sol [14]	16
Figure 3 : Analyse spectrale de la puissance du vent dans la couche limite turbulente, d'après Van der Hoven, 1957 [16].....	16
Figure 4 : Direction et appellation des principaux vents régionaux en France	19
Figure 5 : Carte de statistiques de vent établie à partir des moyennes calculées sur 30 années de 1981 à 2010	20
Figure 6 : Evolution du nombre de tempêtes depuis 1980 par saison tempétueuse	21
Figure 7 : Régions métropolitaines pour lesquelles une baisse du nombre de tempêtes a été détectée	22
Figure 8 : Réseau de surface Météo-France de mesure in-situ du vent en métropole à la date du 01/03/2021	23
Figure 9 : Rafales maximales estimées sur la France lors de la tempête Xynthia (28 au 29/02/2010) à partir de la méthode Vanessa combinant observations et champs du modèle Arome	25
Figure 10 : Carte des records observés de vent instantané aux stations météorologiques Météo-France, non corrigés des conditions locales de mesure	28
Figure 11 : Carte des records par stations en vent moyen sur 10 min, normalisé.....	29
Figure 12 : Localisation des 58 stations météorologiques mesurant la neige en France en 2019 [34]	38
Figure 13 : Arbre de décision du produit Hydre permettant la discrimination des hydrométéores au sol	39
Figure 14 : Cartes des records de neige aux stations Météo-France	41
Figure 15 : Cartes des records de neige issus des Réseau Climatologique d'Etat pour les départements de la Seine Maritime et de la Manche	42
Figure 16 : Densités de probabilité de l'effet des actions (E) et de la résistance (R)	51
Figure 17 : Interprétation graphique de l'indice de fiabilité β	53
Figure 18 : Principe de la chaîne de Markov	66
Figure 19 : Figure 1 et Table 3 de la norme ANSI [71], cas de la région I	68
Figure 20 : Carte de la valeur de base de la vitesse de référence en France métropolitaine (annexe nationale française issue de l'étude statistiques du CSTB [19])	72
Figure 21 : Schéma pour la détermination de la catégorie de terrain	74
Figure 22 : Mesures synchrones de pressions aérodynamiques sur une construction (mesures National Bureau of Standards, USA, archives J. Biétry).....	77
Figure 23 : Hauteur de référence, z_e , dépendant de h et b, et profil correspondant de pression dynamique (extrait Eurocode 1-4)	80
Figure 24 : Découpage des murs de façade en zones de pression, selon les proportions du bâtiment (extrait Eurocode 1-4).....	81

Figure 25 : Illustration du détachement tourbillonnaire.....	83
Figure 26 : Illustration des forces liées au vent s'exerçant sur une cheminée (vue en coupe)	84
Figure 27 : Exemple de représentation d'un modèle numérique de terrain	89
Figure 28 : Exemple de représentation d'une carte de rugosité (valeurs de z_0)	89
Figure 29 : Exemple de maillage surfacique (à gauche) à proximité de la zone d'intérêt (ligne rouge) et d'un plan de coupe verticale avec couche limite (à droite).....	90
Figure 30 : Exemple de lignes de courant obtenues par recalage climatique.....	91
Figure 31 : Exemples de modèles 3D intégrant les « obstacles » significatifs autour d'un bâtiment étudié.....	92
Figure 32 : Exemple d'essai en soufflerie NSA au CSTB.....	98
Figure 33 : Exemple de maquette équipée en capteurs et balance.....	98
Figure 34 : Maquette au 1/250e : Reproduction de l'environnement sur un rayon de 450 mètres centré sur l'auditorium de la Seine Musicale.....	100
Figure 35 : Etude du voile solaire de la Seine musicale, capteur de pression et balance dynamométrique	100
Figure 36 : Etapes de l'application de l'Eurocode 1-4 et méthodes alternatives.....	102
Figure 37 : Evolution du nombre annuel d'événements convectifs récentes par Keraunos depuis 1999	123
Figure 38 : Carte des rafales convectives les plus élevées estimées par Keraunos et mesurées sur la période 1862-2021.....	124
Figure 39 : Carte d'exposition au risque de rafale convective – Keraunos, mai 2022	125
Figure 40 : Illustration de l'ajustement de lois de probabilités sur la distribution des valeurs extrêmes annuelles de la hauteur de neige au sol avec et sans chute exceptionnelle [96].....	128
Figure 41 : Carte des valeurs des charges de neige définies dans l'annexe nationale de l'Eurocode 1-3 (annexe normative).....	130
Figure 42 : Ajustement de la charge de neige sur le sol en fonction de la période de retour, issu de l'Eurocode 1-3 (annexe D informative).....	131
Figure 43 : Principe d'application des charges de neige sur les constructions selon l'Eurocode 1-3	140
Figure 44 : Coefficient de forme pour une toiture attenante à une construction plus élevée ou très proche d'elle sans accumulation (cas i).....	142
Figure 45 : Coefficient de forme pour une toiture attenante à une construction plus élevée ou très proche d'elle avec accumulation (cas ii)	143
Figure 46 : Coefficient de forme pour une toiture attenante à une construction plus élevée ou très proche d'elle avec accumulation (cas ii)	144
Figure 47 : Illustrations des différentes valeurs représentatives d'une action variable	163
Figure 48 : Schéma récapitulatif de la démarche de prise en compte des agressions naturelles	167
Figure 49 : Carte des stations opérationnelles du réseau RADOME en métropole	182
Figure 50 : Réseau de surface de mesure in-situ automatique de la hauteur de neige en métropole (01/03/2021).....	193
Figure 51 : Carte de Vigilance Météo-France du 11/02/2021 à 22h	197
Figure 52 : Domaine de simulation de l'étude pour le site maillé au centre (4,5 x 4,5 x 1 km).....	236

Figure 53 : Résolution horizontale du maillage à proximité des bâtiments.....	236
Figure 54 : Vue d'une simulation LES	238
Figure 55 : Vue d'une simulation LES en coupe.....	238
Figure 56 : Coefficient de forme pour une toiture à un seul versant.....	245
Figure 57 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants sans accumulation (cas i)	246
Figure 58 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants avec accumulation (cas ii et iii).....	246
Figure 59 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiples sans accumulation (cas i).....	246
Figure 60 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiples avec accumulation (cas ii).....	247
Figure 61 : Coefficient d'exposition pour les toitures plates.....	247
Figure 62 : Coefficient de forme pour toitures inclinés (avec $\delta=0,16$).....	248
Figure 63 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants sans accumulation (cas i)	249
Figure 64 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants avec accumulation (cas ii et iii).....	249
Figure 65 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiple sans accumulation (cas i)	250
Figure 66 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiples avec accumulation (cas ii).....	250
Figure 67 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique sans accumulation (cas i)	251
Figure 68 : Coefficient de forme en fonction du ratio h/b pour une toiture cylindrique (pour $\beta \leq 60^\circ$)	251
Figure 69 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique avec accumulation (cas ii).....	251
Figure 70 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique sans accumulation (cas i)	252
Figure 71 : Coefficient de forme en fonction du ratio h/b pour une toiture cylindrique.....	252
Figure 72 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique avec accumulation (cas ii).....	252
Figure 73 : Coefficient de forme pour une toiture dôme sphérique avec accumulation (cas ii).....	253

Tableaux

Tableau 1. Actions du vent sur les structures et équipements et effets potentiels sur l'installation et la sûreté	13
Tableau 2. Actions de la neige sur les structures et équipements et effets potentiels sur l'installation et la sûreté	13
Tableau 3. Possibilités et conséquences de concomitances entre agressions climatique.....	44
Tableau 4. Valeurs des actions variables définies dans l'Eurocode	56
Tableau 5. Combinaisons d'actions retenues par EDF pour les situations accidentelles vent et neige (domaine de conception de référence : Design Basis).....	58
Tableau 6. Valeurs des actions d'accompagnement retenues par le CEA pour les situations accidentelles vent et neige	58
Tableau 7. Combinaison d'actions retenues par le ORANO pour les situations accidentelles vent et neige	59
Tableau 8. Valeur de base de la vitesse de référence du vent (métropole)	72
Tableau 9. Valeurs de z_0 et z_{min} en fonction de la catégorie de terrain (issus de l'Eurocode 1-4).....	74

Tableau 10. Valeurs recommandées des coefficients de pression extérieure pour les murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire (extrait de l’Eurocode 1-4).....	81
Tableau 11. Projectiles retenus actuellement dans différents cadres d’évaluation de la sûreté	107
Tableau 12. Projectiles de référence proposés par les exploitants.....	108
Tableau 13. Projectiles de référence proposés par l’IRSN	110
Tableau 14. Poids volumique apparent moyen de la neige, issu de l’Eurocode 1-3 (annexe E informative)	132
Tableau 15. Modèles de calcul de la densité de neige dans différents pays européens (étude de 1998 [97] reprise dans le rapport [14])	133
Tableau 16. Méthodes de caractérisation de la neige extrême recensées par le GT	135
Tableau 17. Coefficient de forme de base en fonction de la pente pour une toiture à versants inclinés (cas i)	143
Tableau 18. Tableau des situations de projet et dispositions de charge à utiliser selon les conditions de site (Annexe A de l’Eurocode 1-3)	145
Tableau 19. Retour d’expérience sur les sites nucléaires en lien avec un phénomène initiateur de type vent	169
Tableau 20. Retour d’expérience sur les sites nucléaires en lien avec un phénomène initiateur de type neige	175
Tableau 21. Différents types de station définies par Météo-France.....	185
Tableau 22. Classification de la rugosité selon la CIMO	186
Tableau 23. Classes environnementales caractérisant les stations météorologiques.....	187
Tableau 24. Capteurs dédiés à la mesure du vent	189
Tableau 25. Capteurs dédiés à la mesure de la neige	191
Tableau 26. Paramètres VENT disponibles au pas de temps horaire dans la BDClim.....	195
Tableau 27. Paramètres VENT disponibles au pas de temps quotidien dans la BDClim.....	195
Tableau 28. Paramètres VENT disponibles au pas de temps horaire dans la BDClim.....	196
Tableau 29. Statistiques de la vigilance météorologique à Météo-France	199
Tableau 30. Caractéristiques des capteurs de la station météorologique EST 6000	214
Tableau 31. Influence de la correction sur 3 stations météorologiques.....	215
Tableau 32. Exemples de stations pour lesquelles la normalisation change la date du record.....	216
Tableau 33. Records de neige complémentaires issus de l’étude Météo-France de 1993 [34]	217
Tableau 34. Records de neige complémentaires issus du site info-climat.....	217
Tableau 35. Coefficients de forme de la charge de neige en fonction de la pente.....	245
Tableau 36. Coefficients de forme de base en fonction de la pente pour une toiture à versants inclinés	248
Tableau 37. Coefficients de forme pour la neige transportée par le vent en fonction de la pente pour une toiture à versants inclinés ($\delta=0,16$, sauf indication de l’annexe nationale)	248
Tableau 38. Coefficients de forme en fonction de la pente pour une toiture cylindrique	251

1. PERIMETRE ET OBJECTIFS

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a souhaité la mise en place d'un Groupe de travail (GT) traitant des agressions « Vent » et « Neige » à prendre en compte dans la démonstration de sûreté de futures installations nucléaires de base (INB). Ce GT Vent et Neige comprend l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), l'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND) en tant qu'observateur, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), les principaux exploitants d'INB (ANDRA, CEA, EDF, FRAMATOME et ORANO) et d'autres experts compétents dans les domaines des aléas neige et vent et des effets de ces aléas sur les matériels et structures (Baudin Chateauf, CSTB, CTICM, Météo-France, INRAE, ONERA, RTE ainsi que M. Jacques Biétry¹ et Keraunos²).

La saisine de l'ASN [1] précise les attendus de la phase d'élaboration de l'état de l'art par le GT :

« [...] l'état de l'art concerné vise les méthodes de caractérisation des aléas liés à la neige et au vent, ainsi que sur les méthodes d'étude des effets de ces aléas sur les structures et équipements.

Il conviendra que cet état de l'art :

- prenne en compte lorsque cela est pertinent, un état des lieux chez les exploitants des approches retenues pour la prise en compte des agressions naturelles liées à la neige et au vent dans la démonstration de sûreté des INB civiles de surface en France ;

- soit élaboré au regard d'un besoin, in fine, d'harmoniser ces approches et de respecter les niveaux de référence préconisés par l'association WENRA. »

Le présent rapport répond à cette saisine en fournissant un état de l'art établi par le GT ainsi que des préconisations soutenues par tout ou partie du GT sur les thèmes des agressions naturelles liées à la neige et au vent pour de futures installations. Ces préconisations ainsi que les principales conclusions de l'état de l'art sont identifiées par un double trait dans la marge gauche du rapport. Ce rapport pourra servir de base à l'établissement d'un futur guide applicable aux futures INB. L'utilisation de caractères gras vise à mettre simplement en évidence certains éléments dans le rapport.

L'état de l'art mené couvre les sujets aléas et effets pour chacune des agressions vent et neige. Il est organisé de la façon suivante : la 1^{ère} partie du rapport intitulée « Périmètre et Objectifs » donne le contexte de travail ainsi que le cadrage donné au GT ; la 2^{ème} partie présente les phénomènes et données disponibles pour l'étude du vent et de la neige ; la 3^{ème} partie présente les principes de prise en compte des agressions Vent et Neige sur les structures ; les parties 4 et 5 détaillent respectivement la caractérisation de l'aléa et les effets associés au vent et à la neige.

Certaines références bibliographiques correspondent à des versions provisoires de documents que le GT a considéré utile de citer. Le statut de « version projet » est explicitement tracé dans les références et le rapport. C'est le cas notamment des projets de mise à jour des Eurocodes (références [11] à [14]).

1.1. Cadrage issu du GT Agressions externes

Le besoin d'un GT Vent et Neige est tracé dans le rapport « GT Agressions naturelles inter-exploitants » de mars 2021 [2] qui traite de la démarche générale à retenir pour la prise en compte des agressions naturelles externes dans la démonstration de sûreté nucléaire des futures INB. Ce rapport a été produit par un GT traitant des « Agressions naturelles externes », constitué de l'ASN, de l'IRSN et des principaux exploitants d'INB (ANDRA, CEA, EDF, FRAMATOME, ORANO).

Les discussions au sein du GT Agressions naturelles externes ont conduit l'IRSN, l'ASN et les exploitants à « s'accorder sur l'intérêt d'une cible commune pour les installations nucléaires nouvelles en cohérence avec ce que préconisent WENRA [3] et le guide n° 22 de l'ASN élaboré conjointement avec l'IRSN pour les réacteurs

¹ Ingénieur général des Ponts et Chaussées et retraité du CSTB

² Bureau d'étude ponctuellement sollicité sur les rafales convectives liés à des conditions orageuses

électronucléaires [4], à savoir caractériser les aléas avec des niveaux « de référence » associables à une fréquence annuelle de dépassement inférieure à $10^{-4}/\text{an}$ ».

Cependant, notant que la définition du niveau « de référence » associé à cette cible est complexe en l'état actuel des connaissances et nécessite des réflexions complémentaires agression par agression, le GT a émis la préconisation suivante :

« La démonstration de sûreté nucléaire inclut la détermination et l'étude d'événements associés aux agressions d'origine naturelle sur la base d'une démarche conservatrice dans le domaine de conception dit « de référence ». Ces événements sont caractérisés sur la base de la quantification de paramètres pertinents permettant de déterminer les niveaux d'aléas à retenir. Celle-ci est spécifique à chaque site. Pour déterminer ces niveaux d'aléa dans le domaine de conception « de référence », le GT Agressions externes préconise qu'une valeur repère au maximum de $10^{-4}/\text{an}$ en termes de fréquence annuelle de dépassement soit visée. Pour les agressions pour lesquelles les méthodes statistiques ne permettent pas de calculer, avec un bon niveau de confiance, l'intensité associée à cette cible, il doit être déterminé l'intensité de l'événement de référence retenue en complétant la valeur connue approchant le plus la fréquence annuelle de dépassement repère par l'application d'une majoration sur la base d'un scénario dit standard ou par la prise en compte d'un scénario majorant. Cette majoration peut s'appuyer par exemple sur :

- l'application d'une pénalité adaptée au maximum historique connu ;
- l'application d'une pénalité adaptée à une intensité déterminée par des études statistiques avec incertitudes ;
- En tout état de cause, l'intensité retenue doit être suffisamment enveloppe des événements historiques pertinents. »

Ces éléments constituent un cadrage initial des travaux du GT Vent et Neige. Dans la suite du rapport, les termes « cible WENRA » et « Niveau WENRA » sont utilisés pour faire référence aux préconisations ci-dessus et aux niveaux de vent ou de neige qui y répondent. Il est à noter que le cadrage des travaux du GT n'envisage pas de moduler les niveaux de vent ou de neige en fonction d'enjeux de sûreté. L'adaptation aux enjeux de sûreté est faite au travers de l'identification des équipements importants pour la sûreté.

Par ailleurs, le GT Agressions externes a également défini le concept de situation de référence pour le risque d'origine naturel (SRN), la notion de « cumul » en lien avec celle de SRN ainsi qu'une terminologie associée au niveau d'aléa à prendre en compte dans la démonstration de sûreté (cf. Annexe 1).

1.2. Aléas traités dans le cadre du GT Vent et Neige

La démarche retenue dans le GT a consisté à identifier les effets redoutés sur les installations pour ces phénomènes afin d'éclairer la pertinence de les traiter de façon associée au vent et à la neige ou d'identifier si ces effets sont déjà pris en compte par ailleurs.

Par ailleurs, les catégories « vent » et « neige » couvrent en fait différents phénomènes météorologiques (par exemple, la neige peut être dissociée entre neige sèche, collante, mouillée, etc.). Des regroupements ont été opérés pour ne pas multiplier le nombre d'aléas tout en dissociant ceux issus de phénomènes météorologiques significativement différents ou qui ont des effets différents (par exemple, les rafales convectives liés à des conditions orageuses et les vents de tempête).

Les aléas suivants ont été étudiés par le GT :

- les vents forts issus de tempêtes dépressionnaires extratropicales (également appelé vent de tempêtes), et les rafales convectives (parfois appelées rafales d'orage),
- la neige ainsi que, dans la mesure des informations disponibles récoltées, la pluie verglaçante et le brouillard givrant.

Tornade et médicane³ ont été évoqués dans les échanges du GT mais n'ont pas été retenus. Ces agressions n'ont pas été traitées dans ce GT. La tornade en tant qu'agression externe naturelle d'une INB a fait l'objet d'une instruction complète (aléa et effets) multi-exploitants dédiée en 2017 ([7] [8] [21]).

La grêle n'a pas été retenue compte tenu du phénomène initiateur non directement relié à un phénomène de vent ou de neige. Les conséquences de bouchage par de la grêle des dispositifs d'évacuation des eaux pluviales sont déjà prises en compte au travers de la situation de référence définie pour la pluie dans le guide inondation (« SRI PLU »). Il se pourrait que d'autres conséquences soient également couvertes par l'étude des situations « Vent » ou « Neige » ou tornade (charge sur toiture ou projectiles).

Un certain nombre de termes sont utilisés dans la suite du rapport avec le sens qui leurs sont donnés ci-après.

Le terme **agression** renvoie à l'arrêté du 7 février 2012 modifié (*« agression externe : tout événement ou situation qui trouve son origine respectivement à l'extérieur de l'installation nucléaire de base et qui peut entraîner de manière directe ou indirecte des dommages aux éléments importants pour la protection ou remettre en cause le respect des exigences définies »*).

Un **phénomène** est utilisé dans son sens commun d'évènement naturel, susceptible d'étude scientifique.

Un **événement** désigne une réalisation temporelle d'un phénomène observé, simulé ou simplement envisagé.

Le terme **aléa** désigne la caractérisation d'un phénomène via un niveau quantifié et éventuellement une fréquence d'occurrence⁴ et une durée.

L'adjectif **extrême** est utilisé dans le sens de « qui est au-delà de la mesure ordinaire », sans lien avec l'usage spécifique qu'en font parfois certains exploitants pour parler de niveaux allant au-delà du référentiel dans un cadre post-Fukushima.

1.3. Liens entre aléas et effets

Les exploitants participant au GT ont recensé le retour d'expérience issu de leurs installations en lien avec des événements dont l'initiateur est le vent ou la neige. Les événements recensés par les exploitants sont présentés en Annexe 2.

Les sources mobilisées sont hétérogènes et non exhaustives mais le travail a permis d'identifier une typologie d'effets des agressions Vents et Neige / pluie verglaçantes sur les installations.

Le retour d'expérience conforte la liste des effets redoutés listés a priori (dégradation d'ouvrage ou d'équipement, perte de l'alimentation électrique (externe ou interne au site), perturbation des systèmes de ventilation ou du confinement dynamique).

Le retour d'expérience montre aussi que le vent a d'autres effets (mouvement d'eau pouvant contribuer à une inondation, apparition de colmatants qui pourraient obstruer les prises d'eau...). Concernant les colmatants, EDF a identifié trois événements en lien avec des vents forts sur le littoral. L'IRSN a relevé également plusieurs événements d'arrivée massive de colmatants en lien avec la survenue de vent, y compris en bord de rivière.

Un impact sur la fonction de surveillance de l'environnement est également identifié pour 4 événements par l'ANDRA ou le CEA.

Les tableaux suivants ont été élaborés à partir du retour d'expérience collecté. Ils présentent les actions sur les structures et équipements et les effets potentiels sur l'installation. Par rapport au schéma récapitulatif de la

³ Selon le site internet Keraunos, une tempête méditerranéenne de type T.M.S. (Tropical-like Mediterranean Storm ou Medicane) consiste en un système dépressionnaire très resserré et à cœur chaud, à forte composante convective, générant des vents forts (vents moyens ordinairement supérieurs à force 8 Bft), et composé d'une structure nuageuse généralement axisymétrique. Ces caractéristiques conduisent certains T.M.S. à présenter sur une image satellite une morphologie très voisine à celle des tempêtes tropicales - voire des cyclones tropicaux lorsqu'ils développent un "œil" - sans en adopter toutefois ni les dimensions ni la violence.

⁴ Il est plus rigoureux de parler de fréquence de dépassement.

démarche de prise en compte des agressions naturelles présenté en Annexe 1, la 2^{ème} colonne correspond à la case « Effets de la SRN » et la 3^{ème} colonne à la case plus générale « détermination des effets sur l'INB ».

Le GT n'a pas particulièrement mené d'exercice de recensement du REX international. Néanmoins, des retours d'expérience documentés ont été partagés sur quelques événements comme le derecho du 10 août 2020 qui a touché la centrale américaine de Duane Arnold [9].

Concernant la neige, des retours d'expérience en France, hors domaine du nucléaire ont pu être partagés, telle l'analyse de l'effondrement du bâtiment IRSTEA à Montpellier, suite à un épisode de neige important [10].

Tableau 1. Actions du vent sur les structures et équipements et effets potentiels sur l'installation et la sûreté

« Vents »	Actions sur les structures et équipements	Effets potentiels sur l'installation et la sûreté
Vent de tempête (extratropicale)	<ul style="list-style-type: none"> Chargement en pression sur les structures et équipements tenant compte des éventuelles amplifications dynamiques (turbulence, détachement tourbillonnaire) Impact de projectiles 	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des structures et équipements Dégradation du confinement statique (dégradation du bardage et de la toiture) Perturbation des systèmes de ventilation et du confinement dynamique Détérioration des lignes électriques, MDTE (Manque de Tension Externe) Limitation des déplacements sur site, isolement de site
Rafale convective	<ul style="list-style-type: none"> Typologie d'actions similaires à ceux des vents de tempête, avec des valeurs différentes des vents de tempête 	<ul style="list-style-type: none"> Typologie d'effets similaire à celle des vents de tempête

Tableau 2. Actions de la neige sur les structures et équipements et effets potentiels sur l'installation et la sûreté

« Neige »	Actions sur les structures et équipements	Effets potentiels sur l'installation et la sûreté
Neige (Neige sèche, humide ou collante, mouillée)	<ul style="list-style-type: none"> Chargement (sur structures, équipements extérieurs, manchons sur les lignes électriques en cas de neige collante) Hauteur de neige 	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des structures et équipements Bouchage des prises d'air pouvant provoquer une dégradation du fonctionnement des systèmes de ventilation ou de confinement Infiltrations Equipements extérieurs rendus inopérables Détérioration des lignes électriques, MDTE, Isolement du site (en fonction de la durée de l'événement)
Brouillard givrant	<ul style="list-style-type: none"> Chargement sur les structures extérieures (mâts, manchons sur lignes électriques, autres structures extérieur) Épaisseur de givre 	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des structures et matériels métalliques non protégés par une enveloppe extérieure (pylône...) Equipements extérieurs rendus inopérables (mécanismes bloqués, instrumentation) Bouchage des prises d'air et d'évents de bâche Isolement du site

« Neige »	Actions sur les structures et équipements	Effets potentiels sur l'installation et la sûreté
Pluie verglaçante	<ul style="list-style-type: none"> • Chargement sur les structures extérieures (mâts, manchons sur lignes électriques, autres structures extérieur) • Épaisseur de givre • Verglas sur les voies d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation des structures et matériels métalliques non protégés par une enveloppe extérieure (pylône...) • Equipements extérieurs rendus inopérables (mécanismes bloqués, instrumentation spécifique) • Bouchage des prises d'air et d'évents de bâche • Isolement du site

1.4. Autres éléments de contexte des travaux du GT

1.4.1. Place des Eurocodes dans les travaux du GT et plan du rapport

Les Eurocodes sont un ensemble de normes européennes régissant la conception et le calcul des ouvrages conventionnels de génie civil.

Par leur large utilisation actuelle, ils ont constitué un repère méthodologique important dans l'état de l'art mené par le GT. L'approche générale et les fondements théoriques des Eurocodes sont présentés dans la partie 3 du rapport ; les déclinaisons pratiques relatives au vent et à la neige sont présentées respectivement dans les parties 4 et 5.

L'appellation du GT « Vent et Neige » reprend en les inversant les termes des règles « neige et vent » [5] qui prévalaient avant les Eurocodes [6]. L'Eurocode 1 : « Actions sur les structures » comprend une partie consacrée à la neige et une autre au vent, faisant chacune l'objet d'une première version provisoire (ou expérimentale) à la fin des années 1990 et d'une version définitive au milieu des années 2000, suivies, quelques années plus tard, d'une annexe nationale pour la France. Officiellement, en 2010, l'Eurocode 1 remplace les règles nationales sur ces sujets et donc les règles neige et vent NV65 et N84. Dans la suite du rapport, on utilise l'appellation « Eurocode 1-3 » pour désigner la partie 1-3 de l'Eurocode 1 qui traite des charges de neige et « Eurocode 1-4 » pour désigner la partie 1-4 de l'Eurocode 1 qui traite des actions du vent.

Une mise à jour des Eurocodes est actuellement en cours. Les travaux du GT ont pu bénéficier du partage des versions projets de l'Eurocode 0 (Bases des calculs structuraux et géotechniques) [11], et des parties 1-3 (Charges de Neige) [12] et 1-4 (Action du Vent) [13] de l'Eurocode 1 : Actions sur les structures (versions projets en anglais) ainsi que de la version projet d'une étude support sur l'interdépendance des actions climatiques [14].

Cette dernière étude propose une vision sur l'ensemble des aspects impactant les charges climatiques. A titre illustratif, les chaînes de calculs associés au vent et à la neige et décrits dans [14] sont reprises ci-dessus :

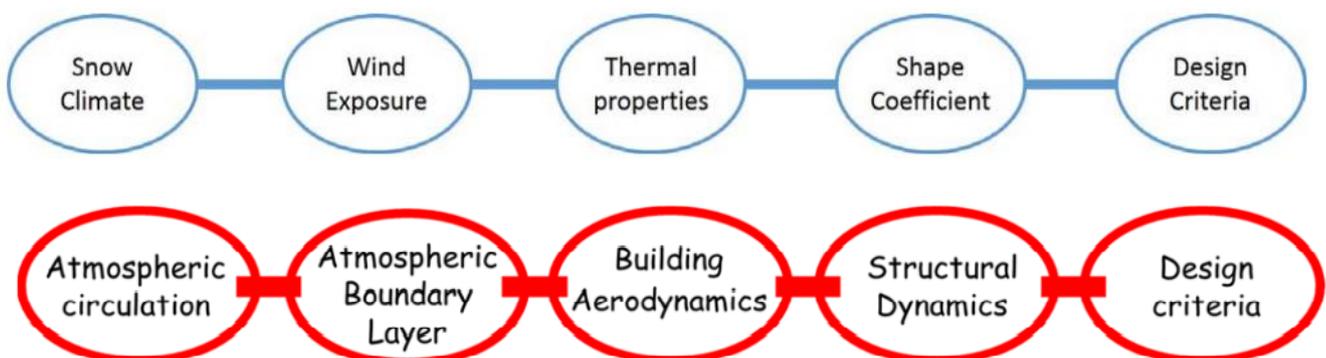


Figure 1 : Représentation des étapes d'évaluation des charges de neige et de vent [14] (inspiré de Davenport Wind Loading Chain)

Le travail mené au sein du GT dépasse le cadre d'étude des Eurocodes car d'autres effets que les effets directs sur les structures sont envisagés. Par ailleurs, le cadrage orienté plus spécifiquement sur la définition de niveaux d'aléas « WENRA » a conduit le GT à approfondir certaines parties ou à en synthétiser fortement d'autres.

L'organisation du rapport peut donc être lue de la façon suivante :

La partie 2 présente les aspects généraux concernant les phénomènes et données (parties à gauche des chaînes en figure 1).

La partie 3 présente des aspects généraux concernant la prise en compte des agressions vent et neige sur les structures (en lien avec l'extrémité droite « Design criteria » des chaînes en Figure 1).

Les parties 4 et 5 exposent les chaînes reliant la caractérisation des aléas vent ou neige et leurs différents effets : effets directs sur les structures, effets indirects⁵ et divers autres effets.

La rédaction d'un glossaire reprenant les notions et notations utilisées dans les Eurocodes s'est avérée utile pour les échanges techniques. Il est présenté en fin de rapport (partie 7).

1.4.2. Objectifs et démarche de prise en compte du changement climatique

L'organisation de la sûreté en France, fondée en particulier sur des réexamens effectués tous les 10 ans, implique de définir des niveaux d'aléas couvrant la période à venir jusqu'au prochain réexamen pour les besoins de la démonstration de sûreté. Pour les nouvelles installations, l'évolution des situations de référence à l'horizon de la durée de vie de l'installation est à prendre en compte, pas nécessairement sous une forme quantifiée, mais par exemple sous forme de facilités d'adaptation et de provisions de marge. Ainsi la quantification précise d'aléas à cette échéance n'apparaît pas nécessaire si une adaptabilité suffisante de l'installation est prévue.

L'état des connaissances associées aux effets des changements climatiques sur le vent et la neige est présenté dans la partie 2 Phénomènes et données.

2. PHENOMENES ET DONNEES DISPONIBLES

Cette partie reprend les éléments de la contribution rédigée par Météo-France, complété par la relecture d'autres membres du GT. Des aspects généraux concernant les réseaux de mesure des observations de surface sont présentés en Annexe 3.

2.1. Vents

2.1.1. Phénomènes et conditions météorologiques

2.1.1.1. La couche limite atmosphérique et la turbulence

Les éléments présentés dans cette partie s'appuient principalement sur la référence [14].

Le vent est un mouvement d'air au sein de l'atmosphère. Différentes échelles de circulations peuvent être identifiées : une circulation globale, une échelle synoptique (l'échelle des cyclones tropicaux et des circulation cycloniques et anticycloniques) et enfin une circulation locale qui recouvre une typologie de phénomènes très différents, de la brise thermique aux rafales convectives liés à des conditions orageuses.

L'interaction de l'écoulement du vent avec la surface terrestre génère une couche limite, appelée couche limite atmosphérique. La rugosité de la surface ralentit l'écoulement et l'énergie cinétique de l'écoulement moyen est transformée en turbulence.

⁵ Les effets directs correspondent à des effets directement exercés par la force de pression du vent ou de poids de la neige sur les ouvrages ou équipements importants pour la sûreté. Les effets « indirects » correspondent aux effets exercés par l'intermédiaire d'un autre objet (exemple : projectiles).

Pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, il est nécessaire de connaître le profil vertical de la vitesse moyenne du vent, ainsi que les caractéristiques de la turbulence. Les profils de la vitesse moyenne du vent sont illustrés ci-dessous pour différents types de rugosité de la surface (en condition de vent fort, stable thermiquement).

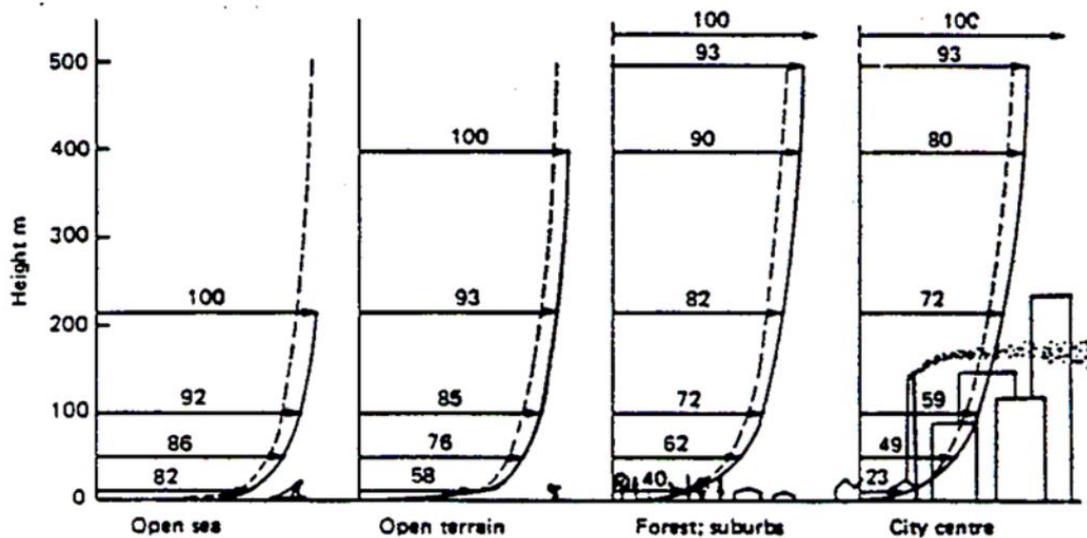


Figure 2 : Profils de vents moyens en fonction de la hauteur pour différentes valeurs de rugosité du sol [14]

L'analyse spectrale d'un signal venteux permet d'identifier les pics d'énergie du vent pour certaines périodes (l'année, la période d'une tempête (3-5 jours), la durée d'une rafale (quelques secondes)).

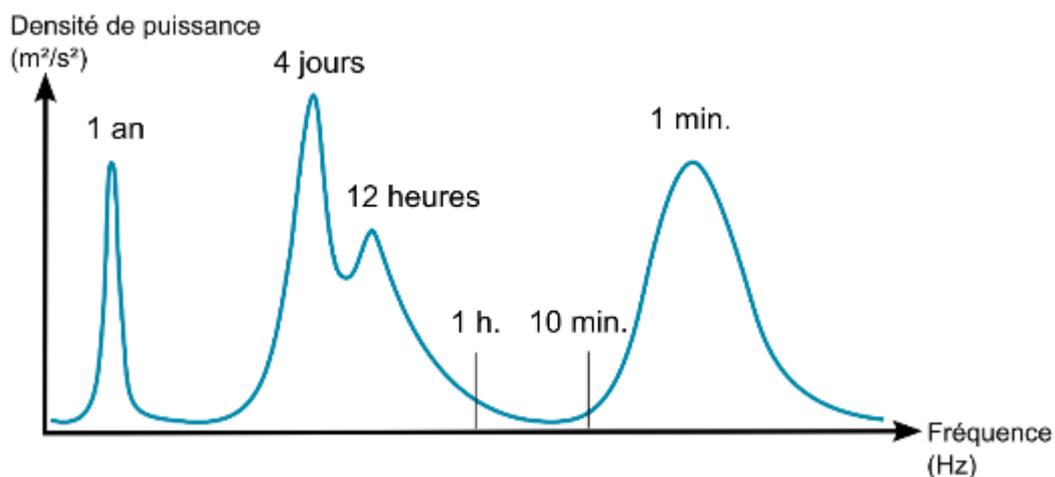


Figure 3 : Analyse spectrale de la puissance du vent dans la couche limite turbulente, d'après Van der Hoven, 1957 [16]

Cette représentation montre une zone de faible énergie entre les pics de gauche et celui de droite. Cela suggère que les parties droite et gauche du spectre sont physiquement séparées. Par conséquent, les fluctuations associées sont statistiquement indépendantes. **On différencie ainsi le vent moyen (généralement moyenné sur 10 minutes) du vent instantané ou de la rafale de vent (le vent instantané est généralement mesuré sur 0,5 s et la rafale de vent est définie par l'OMM comme un le vent intégré sur une durée de 3 s).**

2.1.1.2. Généralités

Définitions

Différentes définitions et critères co-existent autour des notions de vents forts/violents et de tempêtes.

Selon l'échelle de Beaufort, la dénomination de vent violent s'applique aux vents de force 10 à 12 sur l'échelle de Beaufort. L'appellation tempête est réservée aux vents moyens atteignant au moins 89 km/h (valeur minimale de la force 10).

Par ailleurs, l'usage veut que les météorologues nomment « tempêtes » les rafales de vent approchant les 100 km/h dans l'intérieur des terres et 120 km/h (voire 130 km/h) sur les côtes. Lorsque le vent atteint ces valeurs, on va même qualifier de « tempête » la dépression à l'origine de ces vents. Ce terme désigne donc à la fois une zone étendue de vents violents et la dépression qui les génèrent⁶.

Pour caractériser la sévérité d'une tempête, Météo-France prend donc en compte les valeurs de rafales de vent maximales enregistrées mais aussi la durée de l'événement et la surface de la zone affectée par les vents les plus forts (rafales supérieures à 100 km/h ou plus). Ainsi, les tempêtes qualifiées de « majeures » au niveau national affectent plus de 10 % du territoire. Le seuil reconnu de tempête dans les contrats d'assurance s'applique généralement aux rafales supérieures à 100 km/h.

Évènements de grande échelle spatiale

La tempête est un phénomène atmosphérique caractérisé par des vents violents produits par une dépression barométrique fortement marquée. En France, le diamètre des tempêtes est inférieur à 1000 km. Les tempêtes venant de l'Atlantique se déplacent rapidement, jusqu'à 100 km/h. En un point, leur durée n'excède pas quelques heures. En Méditerranée, les dépressions sont influencées à la fois par des effets dynamiques et orographiques. Les vents violents associés peuvent alors persister plus durablement dans un même lieu.

Les dépressions des latitudes tempérées sont l'un des phénomènes atmosphériques caractéristiques des moyennes latitudes. Ce sont des systèmes dits synoptiques, c'est-à-dire que leur diamètre varie entre quelques centaines et quelques milliers de kilomètres et leur durée de vie est d'environ une semaine. En Europe, ces systèmes de grande échelle représentent un mécanisme majeur de transport de la vapeur d'eau. Ils sont aussi parfois responsables d'épisodes intenses de pluie et de vent conduisant à des inondations, à des dégâts liés au vent et à la submersion côtière liée à la houle et la surcote due aux basses pressions. La formation des dépressions nécessite la présence de zones de gradients horizontaux de température en lien avec des vents forts en haute troposphère (vers 8 à 10 km d'altitude) appelés courant-jet.

Évènements de petite échelle spatiale

La tornade⁷ est une colonne d'air tournante très rapide, issue d'un nuage instable qu'elle relie au sol. Dans cette véritable cheminée aspirante la pression est très basse, la chute de pression pouvant atteindre 80 hectopascals (hPa). Les tornades correspondent à un mouvement tourbillonnaire de l'air, très violent, très localisé et bref (quelques minutes à quelques heures), lié à une situation orageuse. En France, le plus grand nombre se produit entre juin et août. En saison hivernale (novembre à mars), on les rencontre plutôt sur les régions côtières, associées à des lignes de grains nées à l'avant de fronts froids tempétueux. Elles sont particulièrement dévastatrices en dépit de leur caractère ponctuel dans le temps et dans l'espace.

Les orages sont à l'origine de vents forts et brefs (quelques minutes) sur une zone restreinte (quelques kilomètres carrés). Les cumulonimbus, nuages caractéristiques de l'orage, animés par des mouvements verticaux puissants créent des rafales de direction imprévisible. Ces rafales sont dites « convectives ».

Les rafales descendantes (« downburst » en anglais) correspondent à un type particulier de rafales convectives qui prennent naissance dans les courants descendants des orages et viennent s'étaler sur le sol en formant des

⁶ page internet [Les vents violents et les tempêtes | Météo-France \(meteofrance.com\)](https://www.meteofrance.com/fr/actualites/les-vents-violents-et-les-tempetes) consultée le 25/05/2022..

⁷ Pour mémoire, comme indiqué en partie 1.2, la tornade n'est pas été traitée dans ce GT.

couloirs relativement concentrés de vents violents. On peut différencier des « microrafales », adaptation française de l'expression anglo-saxonne « microburst » et des « macrorafales ».

Les microrafales désignent les rafales descendantes qui se déploient au sol en présentant une extension horizontale inférieure à 4 km. Les microrafales appartiennent dès lors à la catégorie générale des rafales descendantes, mais avec des dimensions horizontales réduites. Leur durée de vie typique est de 2 à 5 minutes. Elles présentent une forte composante verticale qui tend à produire des dommages au sol qui montrent des signes d'écrasement. La macrorafale constitue un phénomène dont les caractéristiques principales sont voisines de celles d'une microrafale, à la différence près que les macrorafales se déploient au sol avec une extension horizontale supérieure à 4 km. La distinction entre une microrafale et une macrorafale se fait ainsi sur des critères de superficie, et non sur des critères d'intensité (source site internet Keraunos⁸).

Le terme de Derecho peut être utilisé pour qualifier a posteriori un système convectif de mésoéchelle particulièrement intense (type ligne de grains ou échos arqués), présentant certaines caractéristiques en termes de conséquences au sol (décrites plus loin). Ces systèmes peuvent être le siège de micro et macrorafales descendantes, en plus de rafales classiques très violentes. Il s'agit d'un phénomène de grande ampleur qui, par conséquent, est généralement enregistré par des mesures directes à des stations météorologiques. Ce phénomène peut se produire en toute saison, une à deux fois par an. Ce qui définit un derecho est son étendue et sa durée.

Keraunos retient les critères suivant pour définir un derecho [17] :

- présence d'une zone concentrée de dommages consécutifs à des rafales descendantes de nature convective, ou de rafales convectives supérieures ou égales à 90 km/h ;
- cette zone de vents convectifs forts doit s'étendre sur une zone dont le grand axe dépasse 400 km ;
- les rafales convectives doivent répondre à une logique de progression spatio-temporelle identifiable ;
- au moins 3 rafales supérieures ou égales à 120 km/h doivent être mesurées ou expertisées sur la base de dégâts au sein de la zone couverte par l'épisode ;
- ces 3 rafales doivent être séparées d'au moins 64 km les unes des autres ;
- il ne doit pas exister d'interruption de plus de 3 heures entre deux rafales convectives supérieures à 90 km/h.

A noter que des éléments complémentaires sur les rafales convectives sont présentés dans le § 4.9.

Vents régionaux

La direction et la vitesse du vent sont majoritairement imposées par les anticyclones et les dépressions. Cependant, le relief canalise l'écoulement d'air. Des vents apparaissent plus fréquemment dans certaines vallées et zones de piémont où ils sont plus soutenus : il s'agit des vents régionaux. Ils deviennent alors de véritables acteurs du climat local.

⁸ Site internet [Microrafales et macrorafales : explications et définition. Microburst et macroburst. Rafales de vent sous orages. Pédagogie : comprendre les orages - KERAUNOS Observatoire Français des Tornades et Orages Violents \(keraunos.org\)](#) consulté le 22/06/2022

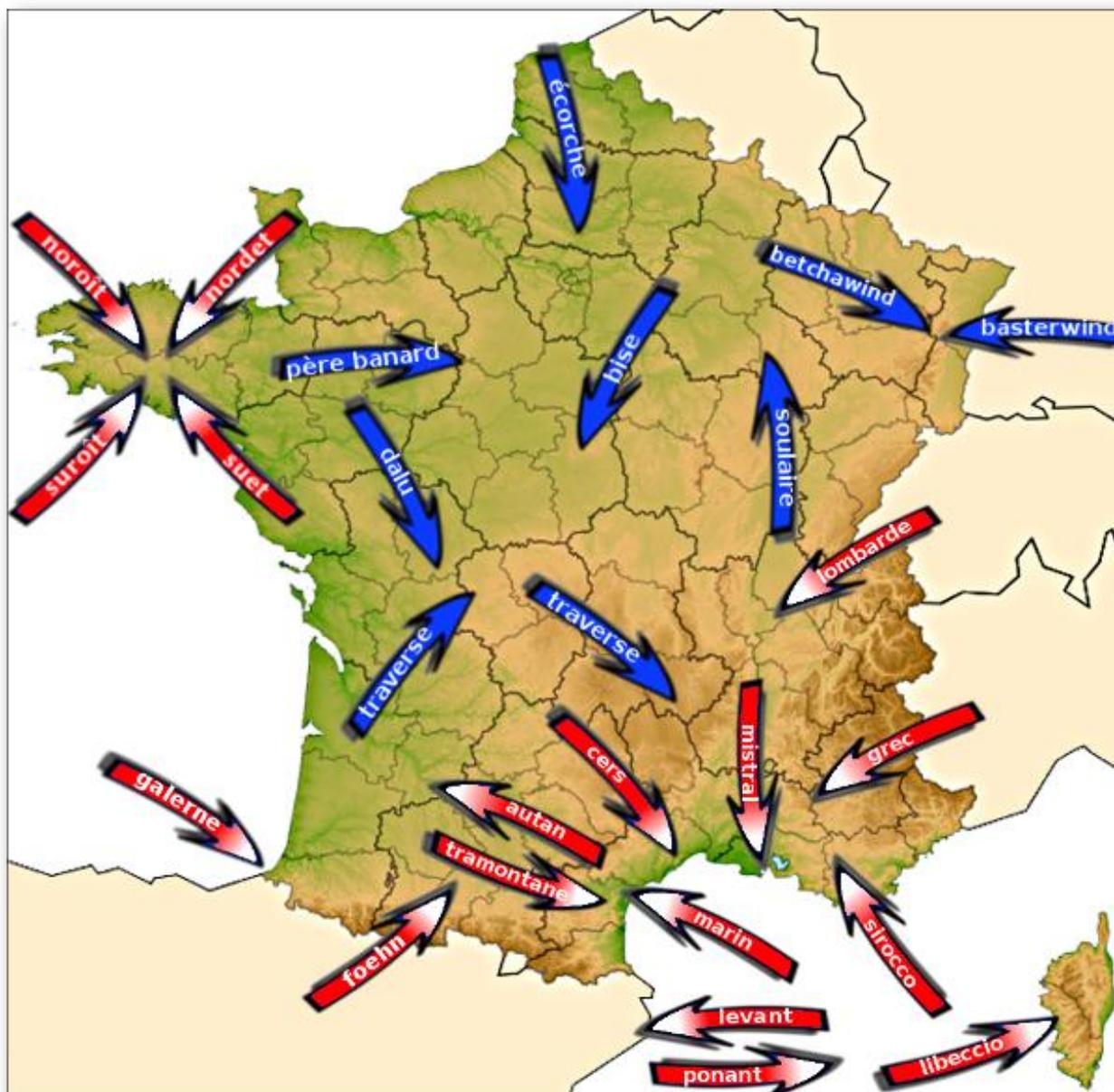


Figure 4 : Direction et appellation des principaux vents régionaux en France⁹

Sur une région, les particularités d'un vent régional peuvent coïncider avec celles du vent de grande échelle. Par exemple, la bise est une dénomination régionale courante du vent froid et assez sec pouvant souffler du nord au nord-est, surtout sur les contrées d'altitude, dans les régions du centre et l'Est de la France ainsi qu'en Suisse.

D'autres vents régionaux présentent en revanche des particularités en vitesse et direction qui les distinguent fortement du vent de grande échelle : ils révèlent l'existence d'une interaction entre certains facteurs topographiques et la situation météorologique à grande échelle.

2.1.1.3. Climatologie des vents violents

Plusieurs tempêtes touchent chaque année l'Hexagone, présentant chacune des caractéristiques propres (trajectoire, dimension, vitesse de déplacement, stade de développement, etc.). Les zones touchées et les

⁹ source <http://tempetes.meteo.fr/Les-vents-regionaux.html> (le site propose des articles dédiés sur les vents régionaux représentés en rouge).

dommages occasionnés sont ainsi très variables. On distingue malgré tout deux principaux types de tempêtes sur la France :

- les tempêtes « océaniques » : les régions les plus exposées de l'Hexagone sont situées entre les Pays de la Loire et la Normandie. Sont également concernés, mais à degré moindre, le Poitou-Charentes ainsi qu'une zone s'étendant de l'Île-de-France au Nord et à l'Alsace. Le Sud-Ouest est moins fréquemment touché, en particulier l'intérieur des terres est rarement concerné ;
- les tempêtes « méditerranéennes » : elles touchent principalement le Sud-Est et le Massif central, mais peuvent parfois déborder sur les régions avoisinantes. Elles sont souvent plus durables que les tempêtes océaniques et peuvent ainsi occasionner de gros dégâts.

Les zones les plus ventées en France se situent principalement :

- sur les zones littorales : Manche, Atlantique, Méditerranée,
- en montagne à proximité de col ou de crêtes : notamment le relief cévenol mais aussi les crêtes des Pyrénées, des Vosges, sans oublier le relief de la Corse,
- au débouché des vallées, et particulièrement la basse vallée du Rhône (mistral) ou de l'Aude (tramontane).

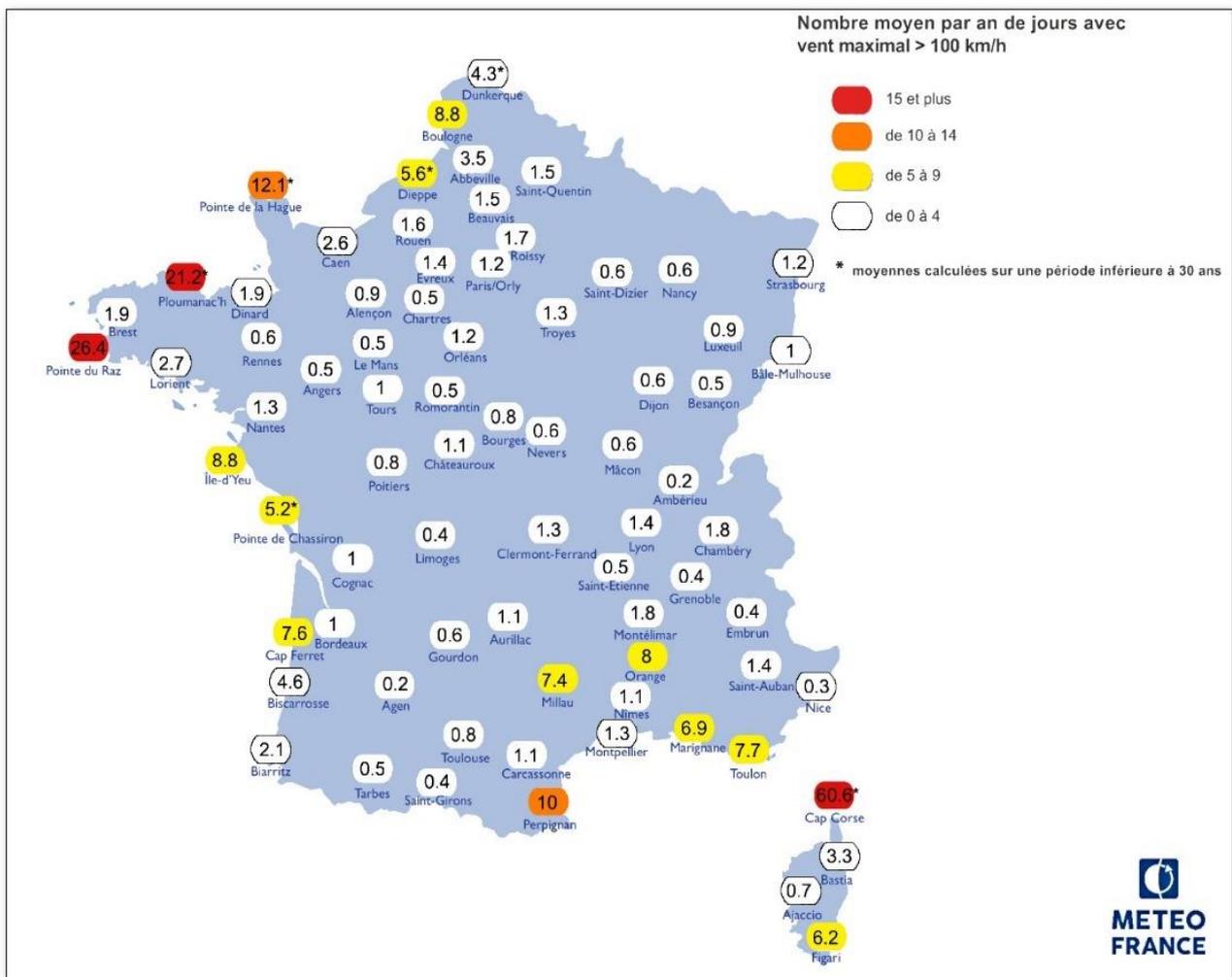


Figure 5 : Carte de statistiques de vent établie à partir des moyennes calculées sur 30 années de 1981 à 2010

2.1.2. Vent violent et changement climatique

2.1.2.1. Evolution passée

D'après le 6^{ème} rapport du GIEC, l'évolution du vent de surface est incertaine, notamment à cause du manque d'observations de bonne qualité. On note néanmoins un ralentissement des vents moyens au-dessus des continents, lié à des changements de la circulation générale et/ou à une augmentation de la rugosité de surface (augmentation des surfaces de forêt notamment). Malgré de grandes incertitudes, on note aussi une diminution de la vitesse des vents extrêmes sur les dernières décennies à l'échelle de l'Europe.

En France, l'analyse de l'évolution des tempêtes s'appuie sur un recensement des événements sur l'ensemble des données disponibles, soit le début des années 1980 pour des mesures fiables de vent fort.

Le nombre de tempêtes ayant affecté le territoire de la France métropolitaine est très variable d'une année sur l'autre. Ainsi, pour les années les plus tempétueuses, 15 ou plus événements ont touché le territoire, dans les années 1980 (1981, 1984 et 1988, 1990), mais aussi plus récemment en 2020, alors que ce nombre tombe à moins de 5 événements par an pour les années les plus calmes (principalement au début des années 2000). Aucune tempête n'a été observée lors de la saison 2005-2006.

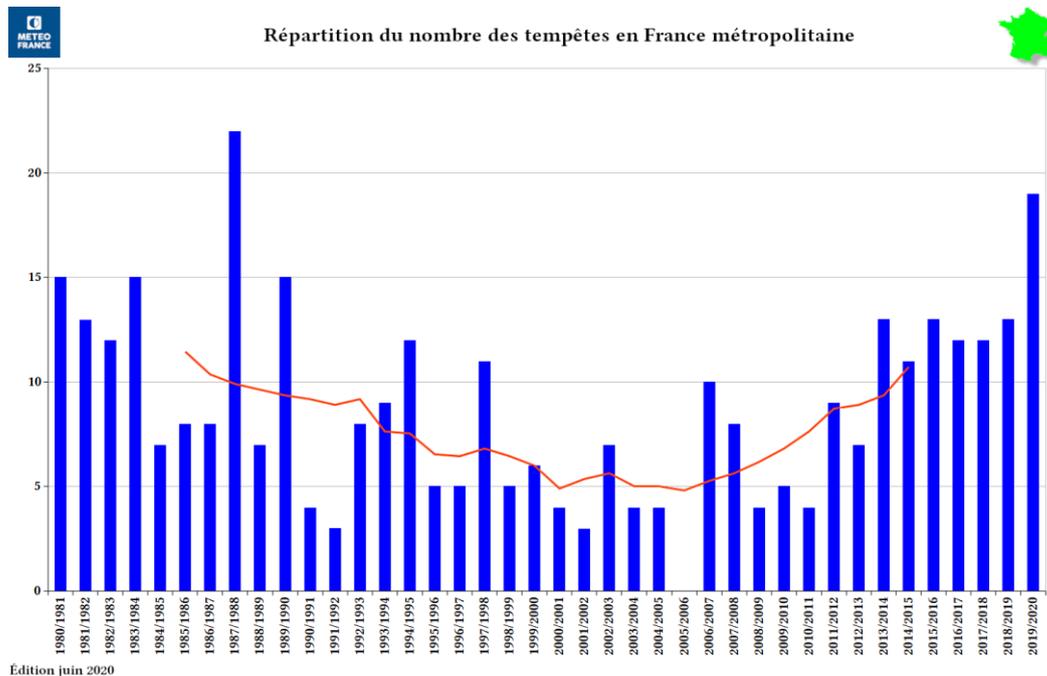


Figure 6 : Evolution du nombre de tempêtes depuis 1980 par saison tempétueuse¹⁰

Sur l'ensemble de la période, on n'observe pas de baisse générale à l'échelle de la France du nombre de tempêtes. Cependant des baisses significatives sont détectables en Normandie, en Bretagne et dans le Limousin¹¹ (en vert dans la carte ci-dessous), sans lien établi avec le changement climatique.

¹⁰ une saison s'étend du 1^{er} juillet au 30 juin de l'année suivante. Source <http://tempetes.meteofrance.fr/>.

¹¹ Les évolutions étant étudiées sur des périodes étendues, les cartes sont présentées selon les anciennes régions administratives (découpage antérieur au 1^{er} janvier 2016).

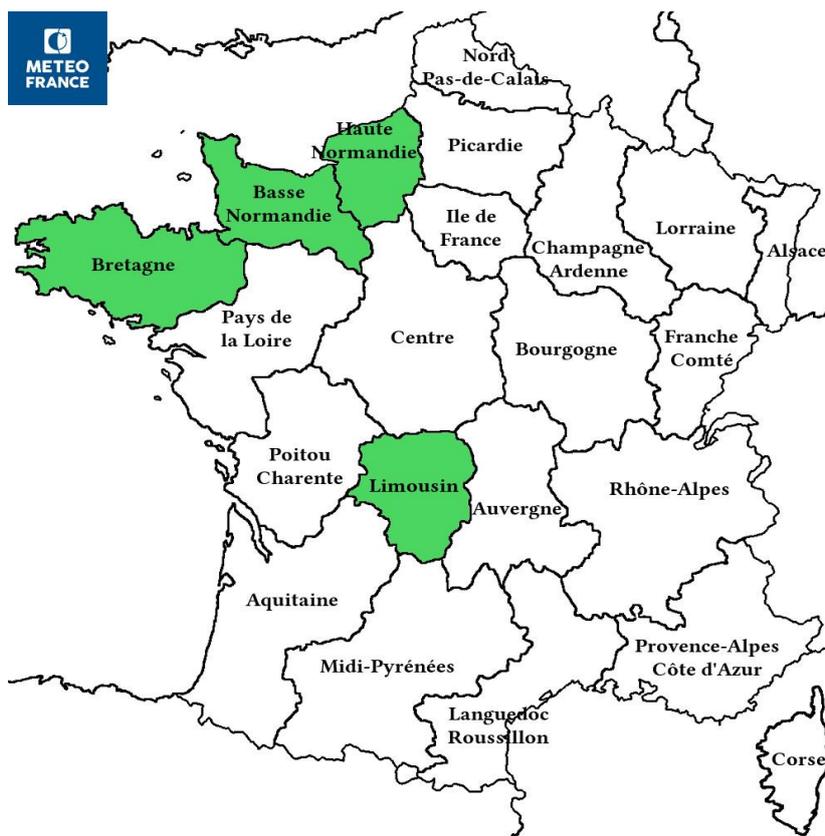


Figure 7 : Régions métropolitaines pour lesquelles une baisse du nombre de tempêtes a été détectée¹²

2.1.2.2. Evolution attendue en climat futur

D'après le 6^{ème} rapport du GIEC, les projections climatiques prévoient une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des tempêtes en Europe du Nord, de l'Ouest et centrale, d'autant plus prononcée que le réchauffement sera fort. En Méditerranée, on s'attend à une diminution de la fréquence et une augmentation de l'intensité des Médicanes (tempêtes Méditerranéennes), dès le milieu du 21^{ème} siècle. En France, l'intensité des vents forts est assez variable selon les régions (maximum sur le littoral de la Manche et de la Méditerranée). Dans les simulations climatiques régionales futures, seul le vent quotidien moyen sur 24 h est disponible, dont les valeurs sont très inférieures aux valeurs observées lors de rafales¹³. Dans le rapport DRIAS 2020 [18], les vents forts sont caractérisés à partir d'un indicateur sur la valeur des vents quotidiens maximums observés dans 2 % des cas (7 jours par an). L'évolution de cet indicateur présente une grande incertitude liée aux modèles climatiques utilisés plus importante que celle des scénarios d'émission de gaz à effets de serre (RCP¹⁴) futur ou à l'horizon temporel futur choisis. Le quart nord-est, voire la moitié nord, à la plus forte probabilité de renforcement du vent. À l'inverse, la moitié sud, et particulièrement le sud-ouest à la probabilité la plus forte d'affaiblissement.

Le 6^{ème} rapport du GIEC aborde également la question de l'évolution des extrêmes climatiques comme les orages intenses. Les vents extrêmes et les tempêtes convectives sévères sont traités dans des paragraphes différents mais les conclusions sur les tendances observées et les évolutions futures dépendent des régions concernées de

¹² Source <http://tempetes.meteofrance.fr/>

¹³ La variable rafales de vent (wsgsmax = daily max near-surface wind speed of gust) existe pour la plupart des simulations EURO-CORDEX (mais pas toutes). Elle ne fait pas partie du jeu DRIAS-2020, jeu de données de projections climatiques débiaisées sur la France, car cette variable n'est pas disponible dans la réanalyse SAFRAN, servant de référence en termes d'observation. La production d'un jeu de données de projections climatiques débiaisées de rafales de vent sur la France nécessiterait donc des travaux particuliers.

¹⁴ Representative Concentration Pathway » en anglais, « Trajectoires représentatives de concentration » en français

la planète et présentent de grandes incertitudes. A ce jour, comme formulé par Météo-France en juin 2022¹⁵ : « *Tout porte à croire que dans un climat plus chaud, les conditions seront de plus en plus favorables à l'émergence de situations orageuses particulièrement sévères* ».

2.1.2.3. Conclusion

L'impact du changement climatique sur les vents violents en France métropolitaine est incertain du fait d'une forte variabilité interannuelle des tempêtes, d'une difficulté à observer de façon fiable les extrêmes de vent et à modéliser les vitesses de vent instantanées et les rafales convectives.

Dans le cadre de la sûreté nucléaire, le GT préconise une veille sur l'évolution des connaissances concernant l'impact du changement climatique sur les vents violents.

2.1.3. Observations et produits d'analyses

2.1.3.1. Observations

Le réseau d'observation du vent est composé en 2021 d'environ 1000 stations. Les capteurs ultrasoniques remplacent progressivement les capteurs vent mécaniques (anémomètre et girouette) à l'occasion du renouvellement de l'instrument (cf. figure ci-dessous).

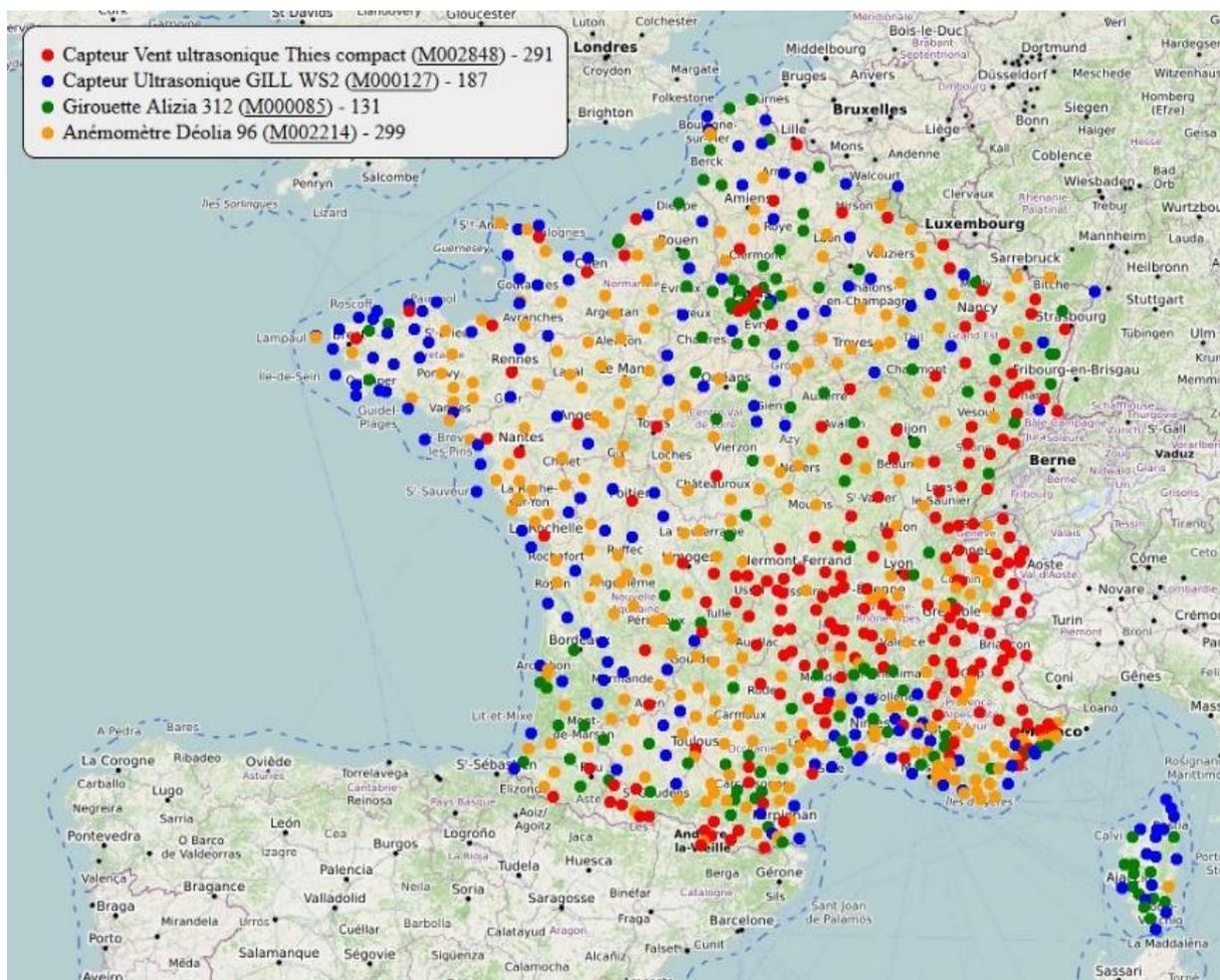


Figure 8 : Réseau de surface Météo-France de mesure in-situ du vent en métropole à la date du 01/03/2021

¹⁵ <https://twitter.com/meteofrance/status/1539627359653007361>

En plus des réseaux propriétaires de Météo-France (**réseau RADOME et réseau climatologique d'État (RCE)**), Météo-France opère des réseaux en partenariats pour répondre à des besoins d'organismes partenaires. Le **réseau SEMENCE** héberge les données météorologiques sur des sites EDF (20 stations) ainsi que sur des sites CEA (7 stations) et ORANO (2 stations). Ces différents réseaux sont présentés en détails en Annexe 3. Ils sont rassemblés dans la **Base de Données Climatologiques BDClim** de Météo-France.

Métadonnées

Les mesures des réseaux d'observations sont associées à des métadonnées. En plus des métadonnées « standard » que sont la localisation géographique (longitude, latitude, altitude) et le repérage temporel (année/mois/jour et heure/minute/seconde), les mesures réalisées par les stations sont caractérisées par deux paramètres importants : le type de la station et sa classe environnementale.

Le paramètre « type de station » permet de classer les différentes stations en prenant en compte d'une part le délai de mise à disposition des données dans la BDClim et d'autre part le délai d'expertise de ces données.

Le paramètre « classe environnementale » est associé non pas à une station, mais à un paramètre (température, vent, etc.) et définit la qualité de la mesure. Plus précisément, il caractérise la représentativité du site de mesure (pour un paramètre), en prenant en compte l'instrumentation utilisée, la nature du terrain et la présence éventuelle d'obstacles susceptibles de perturber la mesure.

Rugosité

La mesure du vent n'est pas perturbée uniquement par les obstacles environnants ; la rugosité du terrain exerce aussi une influence. Pour l'Organisation météorologique mondiale (OMM), le vent de surface mesuré aux stations terrestres doit s'approcher le plus possible du vent qui soufflerait à une hauteur géométrique de 10 m sur un site ayant une longueur de rugosité égale à 0,03 m.

C'est en quelque sorte un vent de référence dont on connaît les conditions exactes de mesure (hauteur : 10 m et longueur de rugosité : 0,03 m). Il convient donc de décrire la rugosité du terrain autour du site de mesure. La longueur de rugosité peut servir à convertir le vent mesuré en vent de référence, mais cette méthode ne peut s'appliquer que si les obstacles éventuels sont suffisamment éloignés.

Les conditions de mesures ainsi définies correspondent à des conditions de référence, terme utilisé dans l'Eurocode 1-4 et qui correspond aux conditions suivantes au sens de l'Eurocode 1-4 :

- Capteur de vent à 10 m de hauteur,
- Rugosité de catégorie II (longueur de rugosité égale à 0,05 m) correspondant, dans un grand rayon autour de l'instrument de mesure, à un terrain plat¹⁶ ouvert, recouvert uniquement d'herbe et de rares obstacles isolés (rase campagne),
- Sans obstacle alentour.

Classe environnementale

La présence d'obstacles se traduit (presque toujours) par une diminution du vent moyen, mais a un effet moindre sur les rafales. De façon générale, les mesures sont effectuées à 10 m, à savoir la hauteur conventionnelle pour les mesures météorologiques.

L'annexe 3.1 présente plus d'éléments sur les réseaux d'observation météorologique de surface. Les différents capteurs de vent présents sur les stations Météo-France sont présentés en annexe 3.2.

2.1.3.2. Produit d'analyse : VANESSA

Le produit opérationnel de spatialisation VANESSA (Vent ANalysé Sous Supervision Arôme) développé par Météo-France assimile les observations de vent dans le modèle AROME. Ainsi, il a été développé une méthode de spatialisation originale s'appuyant sur une régression multiple et un krigeage des résidus. La régression utilise

¹⁶ Plat dans un grand rayon tout autour de l'anémomètre et pas seulement sur quelques dizaines de mètres

les observations de rafales de vent (environ 450 mesures chaque heure), les paramètres du relief (altitude, composantes u et v du vecteur de pente, coefficient de concavité/convexité, écart-type des altitudes des points voisins) et les données du modèle météorologique AROME (vent moyen 10 m, rafale, stress du vent, vent moyen 850 hPa et 500 hPa ainsi que la pression au niveau de la mer), dont la physique non hydrostatique est particulièrement adaptée pour représenter ce type de phénomène et de même que sa haute résolution spatiale (d'un ordre de grandeur kilométrique sur la France). Cette méthode, évaluée par validation croisée, permet d'améliorer significativement l'analyse des vents maximum lors des événements de tempête avec une erreur quadratique moyenne limitée entre 10 et 20 % pour les vents supérieurs à 16 m/s.

La méthode de spatialisation du vent moyen et des rafales Vanessa, a été développée à Météo-France après le passage de la tempête Xynthia du 28 février 2010 et permet d'établir un diagnostic sur les tempêtes à haute résolution spatiale (grille de 2,5 km). Le diagnostic des tempêtes s'appuie sur le calcul d'un indice de sévérité. Celui-ci est déterminé à partir de cartes spatialisées de vent (calcul des surfaces touchées par des vents dépassant des seuils de 100, 120, 140 et 160 km/h).

La carte ci-dessous présente un exemple de sortie Vanessa.

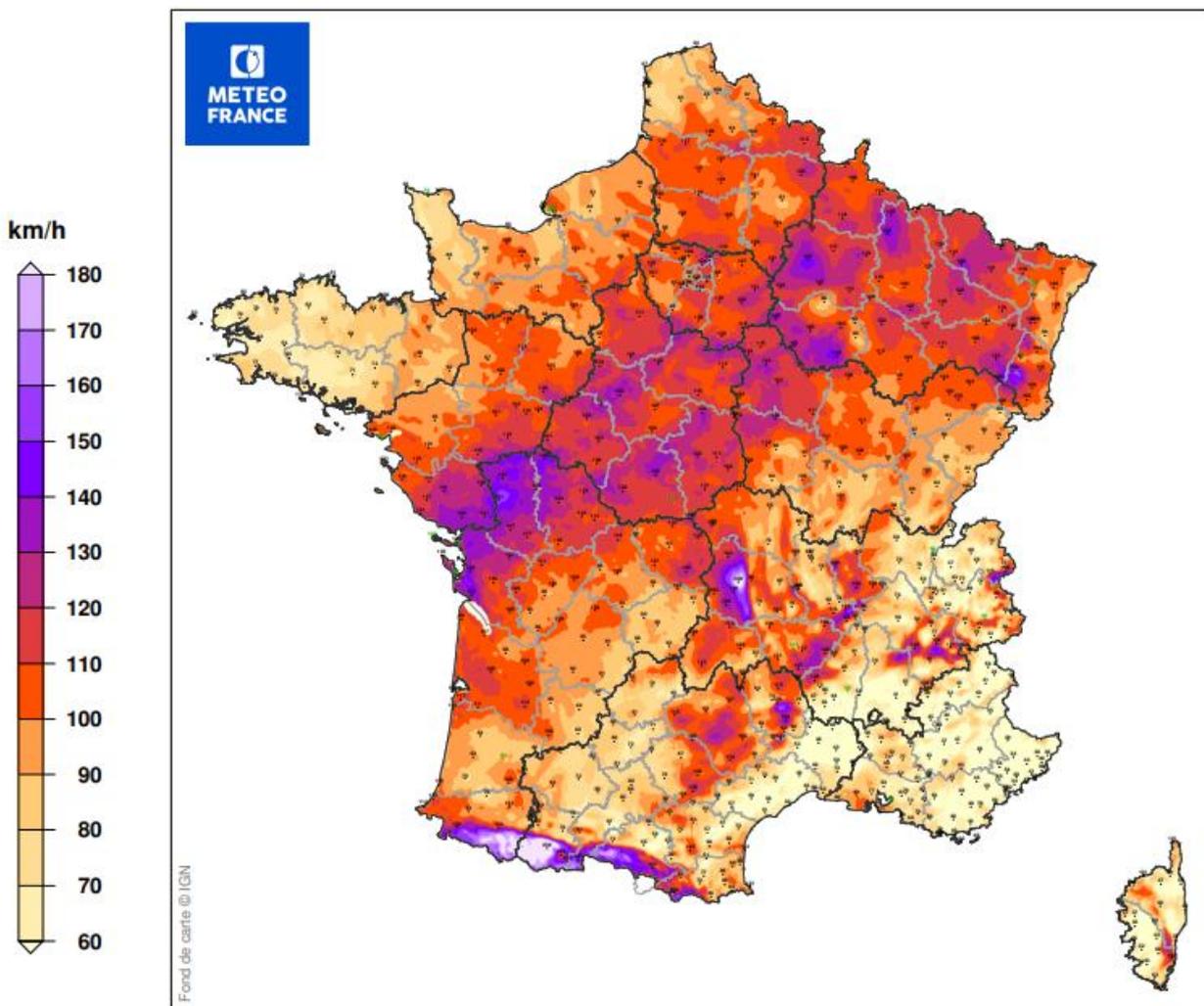


Figure 9 : Rafales maximales estimées sur la France lors de la tempête Xynthia (28 au 29/02/2010) à partir de la méthode Vanessa combinant observations et champs du modèle Arome

2.1.3.3. Mesures réalisées sur les sites nucléaires

Dans le cadre du travail du GT, les exploitants ont recensé les mesures de vent disponibles sur leurs sites. Les caractéristiques des stations et des mesures sont recensées dans les tableaux en Annexe 4.

Les mesures de vitesses de vent sur les sites nucléaires sont faites en application de deux règles fondamentales de sûreté qui définissent les moyens de mesures météorologiques nécessaires au voisinage de chaque site :

- la RFS V.1.b spécifique aux REP et datant de 1982¹⁷,
- la règle SIN-A-4212-83 spécifique aux sites ne comportant pas de REP et datant de 1983¹⁸.

Le but de ces mesures n'est pas de caractériser précisément les périodes de vent fort mais d'évaluer les transferts atmosphériques de rejets d'effluents radioactifs gazeux en fonctionnement normal et en situation accidentelle.

Les échanges au sein du GT ont permis d'établir les éléments suivants au sujet de ces mesures.

Certains exploitants ont identifié des périodes manquantes dans les chroniques d'observations ainsi que des valeurs aberrantes, ce qui les a conduits à écarter l'utilisation de ces données de mesures sur site.

Des mesures à pas de temps fin sont parfois réalisées mais en général, seules les mesures de vent moyen sur 10 min sont enregistrées. L'accès aux valeurs d'intensités de turbulence n'apparaît en général pas possible via les mesures sur site en place¹⁹.

Par ailleurs, l'évolution de l'environnement de la station a pu conduire à modifier les conditions de mesures au cours du temps. Les instruments de mesures ne sont par ailleurs pas tous adaptés à la mesure des vents forts (mesures Sodar par exemple). Ainsi, les exploitants considèrent aujourd'hui les données mesurées sur site insuffisamment fiables, ou fiables sur une période trop courte, pour l'étude des vents forts (en particulier pour les observations passées).

Lorsque les mesures sur site ont au départ été installées à des fins de surveillance vis-à-vis des problématiques de rejets, la collecte et l'archivage des mesures n'a pas été conduite dans un objectif de constituer des séries d'observations homogènes pertinentes pour une exploitation statistique (déplacements possibles de capteurs, utilisations de capteurs différents à certaines périodes, lacunes dans l'archivage...). Sur certaines données anciennes, on ne dispose pas d'éléments suffisants sur les métadonnées.

Un descriptif détaillé de la station météorologique du Centre Meuse Haute-Marne, comprenant notamment une analyse de l'évolution de l'environnement de la station au fil du temps, a été tracé par l'ANDRA en partie 4.2 de l'Annexe 4.

D'après Météo-France, les données fournies par les exploitants et intégrées au réseau SEMENCE sont soumises aux mêmes vérifications que les données des stations Météo-France. Ces données sont revues en fin de mois, lorsque tous les réseaux ont fourni leurs observations. Des contrôles supplémentaires visant à corriger les données aberrantes ont lieu sur un cycle de 3 mois. La seule différence entre les données SEMENCE et celles de la BDClime est que les données SEMENCE ne sont pas mises en vente ni publiées.

En conclusion, le GT souligne que les mesures sur site sont les plus informatives et représentatives des conditions du site. Des échanges au cas par cas semblent nécessaires entre les exploitants et Météo-France pour clarifier la validité des mesures de vent faites sur les sites.

Ces mesures pourraient servir :

- à vérifier que les observations sur site sont bien couvertes par la valeur de vent retenue pour le référentiel (Cf. § 4.2, préconisation sur la prise en compte de records régionaux) ;

¹⁷ <https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/rfs/rfs-relatives-aux-rep/rfs-v.1.b.-du-10-06-1982>, page consultée le 22/06/2022.

¹⁸ <https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/rfs/autres-rfs/regle-sin-n-a-4212-83-du-12-08-1983>, page consultée le 22/06/2022.

¹⁹ Depuis 2019, sur le site de Cadarache du CEA, la méthode dite de Yamartino est ajoutée à l'acquisition de la direction du vent afin d'estimer l'écart type en direction et remonter à une connaissance de la turbulence horizontale utile pour les calculs de dispersion atmosphériques.

- à évaluer les effets de reliefs et rugosités autour du site via des corrélations entre données site et stations Météo-France de référence²⁰, à partir d'observations sur quelques années (cf. § 4.4) ;
- éventuellement à mener des études statistiques de vent moyen sur 10 min (cas de figure a priori rare car il faut disposer d'une chronique d'observation longue, sans période manquante importante et pour lesquelles les mesures des vents forts ont été validées). Cet échantillon devrait également être homogène dans le temps et fiable (quantité de données manquantes faible, métrologie maîtrisée...).

Le GT rappelle que la qualité des données météorologiques in situ dépend principalement de trois grands types de facteurs :

- **les propriétés intrinsèques des capteurs et instruments de mesure ainsi que des systèmes d'acquisition des données,**
- **l'ensemble des opérations de maintenance,**
- **la représentativité du site où sont implantés les systèmes de mesure vis-à-vis du site de l'exploitant et l'environnement des systèmes de mesure.**

Pour estimer la qualité des mesures et son évolution au cours du temps, il convient d'assurer la documentation des facteurs précités : type de capteurs/instruments, systèmes d'acquisition, programme de maintenance associé et environnement du site, de préférence complété par une illustration sous forme de photos.

Des contrôles complémentaires peuvent être opérés afin de s'assurer de la qualité des données. Ceux-ci devraient également être documentés, notamment l'élimination de données « aberrantes » dans le cadre d'un tel processus de contrôle. En effet des valeurs qui pourraient sembler statistiquement aberrantes peuvent au contraire être le reflet d'évènements météorologiques extrêmes.

Sur le sujet des contrôles qualité, le lecteur pourra se référer à la partie 3.1 de l'Annexe 3 (contribution complémentaire de Météo-France concernant l'observation de surface, les capteurs utilisés ainsi que la BDCLim).

2.1.3.4. Records de vent observés

Cette partie est issue d'un travail de documentation des records de vents mesurés en France métropolitaine, mené par l'IRSN en support aux travaux du GT.

La carte ci-après présente les valeurs de vent maximum observées sur une centaine de stations météorologiques. Il s'agit de valeurs de vent instantané qui incluent les effets locaux (rugosité, constructions avoisinantes, etc.) et d'orographie.

Quelques autres records mesurés entre 1982 et 2019 et disponibles sur le site tempetes.meteo.fr de Météo-France ont également été ajoutés.

²⁰ Une station de référence d'un site nucléaire une station Météo-France considérée comme représentative des conditions météorologiques du site. Pour le vent, cette représentativité peut être considérée « hors effets locaux ». La transposition directe des mesures d'une station météorologique à un site a été discuté au sein du GT et ne fait pas consensus. L'inconvénient majeur est que cette approche ne permet de disposer d'une vitesse de vent en conditions de référence au sens de l'Eurocode1-4. En tout état de cause, de telles corrélations permettant de « transposer » la série météo de grande profondeur au niveau du site d'étude doivent être établies par secteur de direction sur la période où les mesures sur site sont disponibles. Dans le cas présent, où la cible concerne les vitesses de vents forts, un seuil minimal de vitesse peut être considéré pour établir ces corrélations. L'établissement de ces corrélations reste un exercice délicat, particulièrement lorsque les directions de vent ne coïncident pas entre le site et la station météo associée. Les mesures corrélées par secteur de direction doivent conduire à un coefficient de détermination significatif, tout en contenant un nombre de données suffisant pour être considéré comme pertinent. Cette seconde approche peut également s'appliquer en complémentarité avec une approche par simulation numérique.

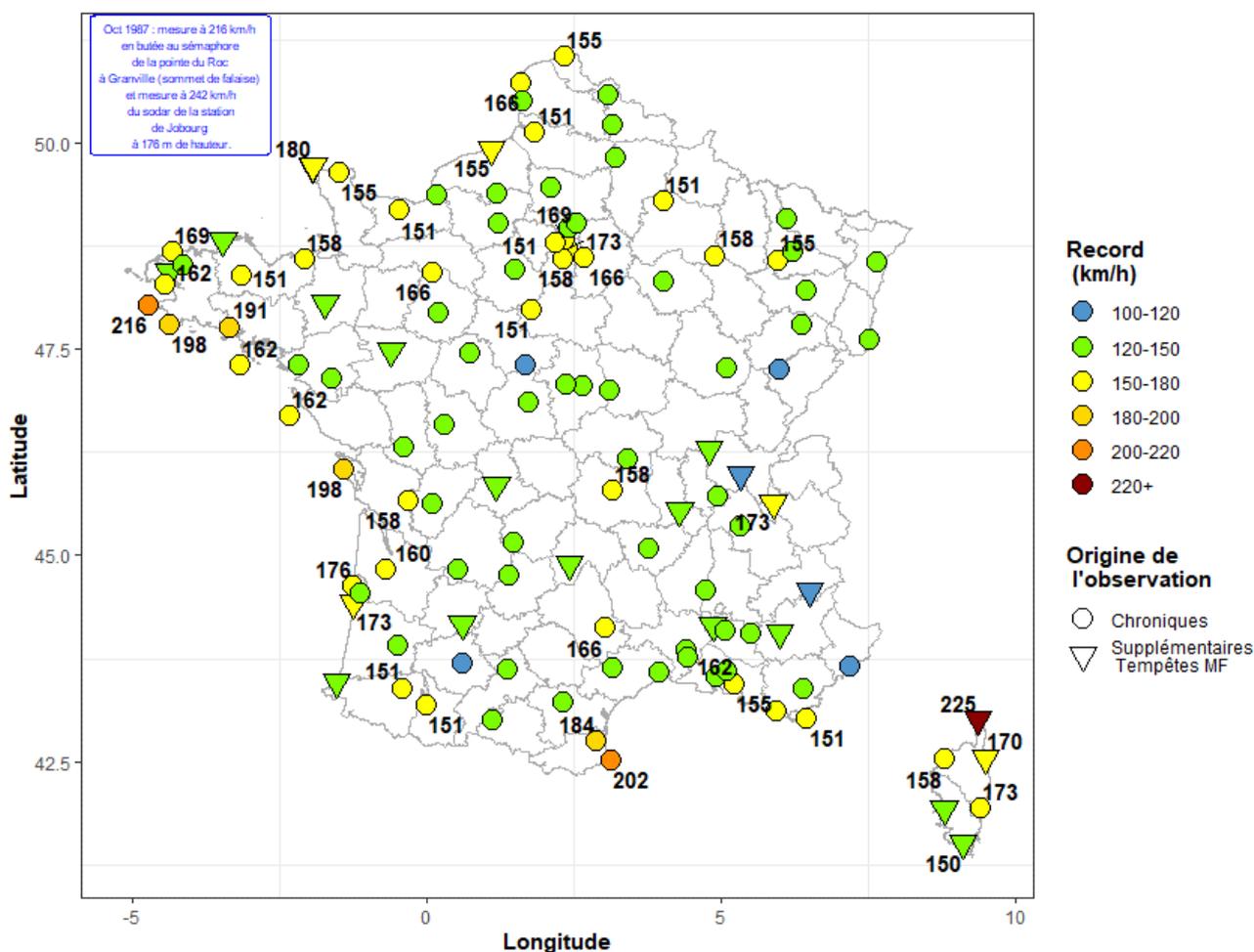


Figure 10 : Carte des records observés de vent instantané aux stations météorologiques Météo-France, non corrigés des conditions locales de mesure ²¹

D'autres valeurs records mesurées ailleurs que sur la centaine de stations retenue pour la carte ci-dessous pourraient également être recensées. On peut citer à ce titre le record de vent mesurée à 225 km/h à la station Marignana (station située à 515 m d'altitude) lors de l'épisode orageux qui a atteint la Corse le 18 août 2022.

Les vitesses maximales des rafales convectives ne sont que rarement mesurées par une station météorologique. Pour ces phénomènes convectifs locaux, une estimation de vitesse peut cependant être menée a posteriori. A noter que les records de rafales convectives ont également fait l'objet d'un travail spécifique dans le cadre du GT à partir de données fournies par Keraunos. Une carte des records de rafales convectives est présentée en dans la partie 4.9 qui traite spécifiquement de ce phénomène.

Une autre carte a été produite à partir des mêmes observations de Météo-France : il s'agit d'une carte des vents moyens sur 10 min dont les valeurs ont été corrigées pour être représentatives des conditions de référence (mesure à 10 m de hauteur, rugosité de catégorie II (équivalent « rase campagne » ou une longueur de rugosité de 0,05 m) et absence d'obstacles alentours). Cette correction est appelée « normalisation ».

²¹ La période d'observation disponible sur les 101 stations météorologiques étudiée est 1970-2018. Parmi les 101 stations, 9 ont vu leur record atteint avant les années 80 et pour chacune de ces stations les anémomètres Papillon (connus pour pouvoir surestimer les vitesses de vent fort) avaient été remplacés fin de années 60. Il s'agit des stations de : Landisiau ; Tours ; Romorantin, St Etienne-Boutheon, Lille-Lesquin, Pau-Uzein, Tarbes-Lourdes-Pyrénées, Cap Bear et Toulon.

La méthode de normalisation des observations de vent présentée ici a été développée par le CSTB et utilisée dans plusieurs de ses études notamment le rapport de 2005 sur la cartographie des vents extrêmes en France Métropolitaine [19]. Elle est expliquée plus en détail dans l'Annexe 5.

Observation maximum par station en Vent moyen normalisé

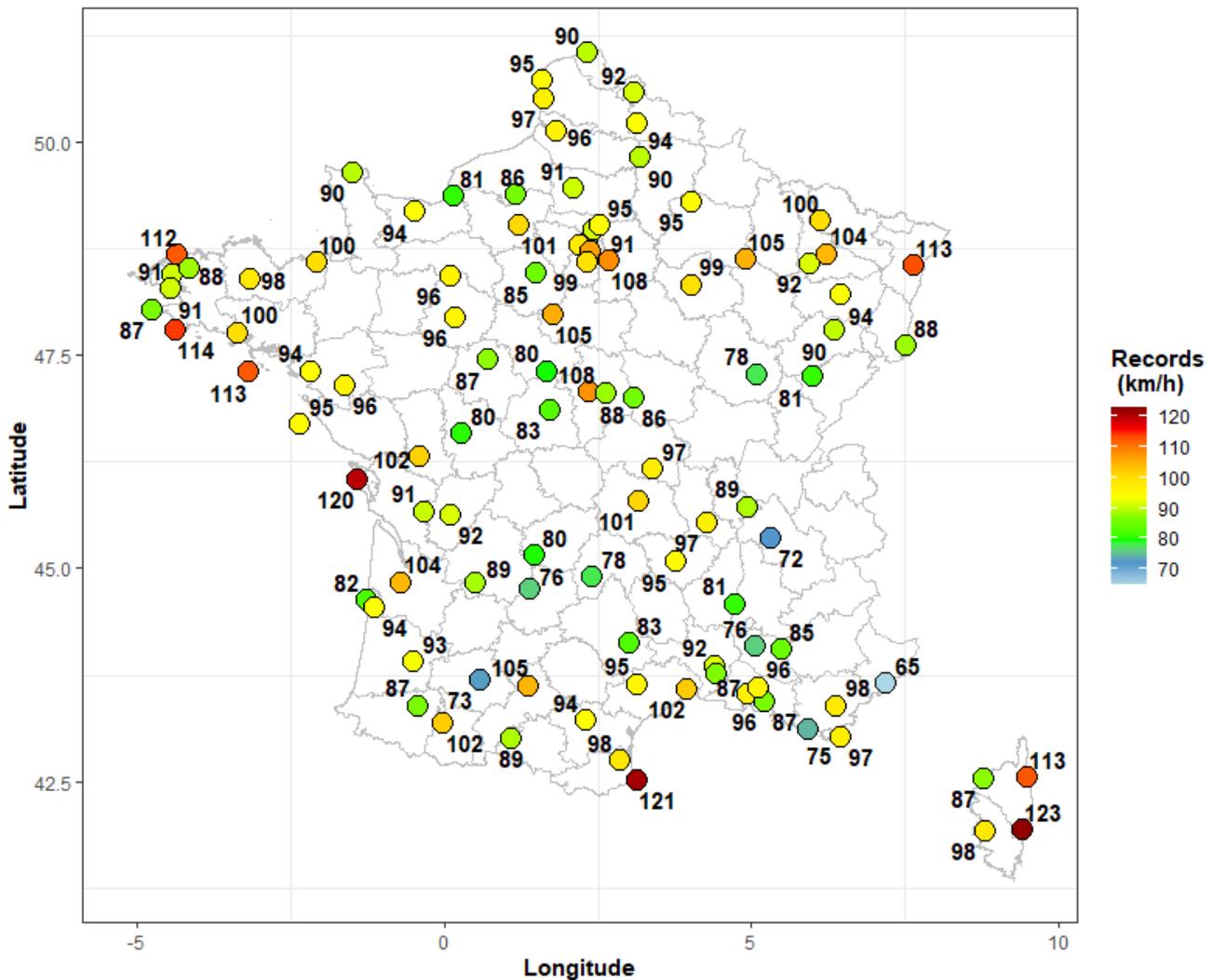


Figure 11 : Carte des records par stations en vent moyen sur 10 min, normalisé.

Conclusion

Le GT souligne l'importance de s'appuyer sur les observations et records historiques pour justifier que les valeurs d'aléas retenues sont bien enveloppes du retour d'expérience pertinent.

Cette analyse tient compte des effets locaux qui peuvent influencer significativement sur les valeurs des records (par exemple les observations faites sur des sémaphores exposés et en surplomb de la côte peuvent conduire à des records supérieurs aux valeurs en conditions de référence habituelles).

Les régions dans lesquelles on recherche les records sont à adapter vis-à-vis du phénomène (vent dépressionnaire, rafale convective) et du site étudié. Une région ne se limite pas à la zone située entre le site et la station météorologique Météo-France la plus proche ou de référence. Le relief est un élément important dans la définition des régions.

2.1.4. Conclusion et préconisation sur les données de vent à prendre en compte pour la caractérisation des vents violents

Le GT préconise de travailler sur des vitesses moyennées sur 10 minutes plutôt que sur des données instantanées pour caractériser un niveau d'aléa WENRA. En effet, les effets directs du vent sur une structure sont évalués au travers de la pression dynamique de pointe, elle-même établie selon l'Eurocode 1-4 à partir d'une vitesse moyennée sur 10 min et d'une intensité de turbulence (cf. 4.5 Schéma de synthèse).

Il n'est pas approprié d'évaluer une vitesse moyennée sur 10 min à partir d'une seule vitesse instantanée maximale car il n'y a pas de relation directe entre ces deux variables. Le rapport entre la vitesse maximale et la vitesse moyenne est une variable aléatoire, étudiée notamment par Alan Davenport [22]. Les facteurs de rafale (ou de « pointe ») sont des valeurs moyennes de la distribution statistique de ce rapport aléatoire. On les utilise en pratique pour passer d'une vitesse moyenne sur 10 minutes à une vitesse de pointe (ou bien d'une vitesse de pointe à une vitesse moyenne), mais ils ne donnent en réalité qu'un ordre de grandeur.

Même lorsqu'elles sont mesurées à des stations météorologiques de bonne qualité, les mesures de vent moyen sur 10 minutes peuvent être influencées par des effets locaux dus à l'environnement du site de mesure. **L'analyse de la qualité et de la validité des données utilisées pour caractériser l'aléa vent est une étape nécessaire avant de procéder à une analyse statistique de ces mesures.**

Les limites et précautions à prendre pour l'application de calculs d'extrapolation statistique aux variables hydrométéorologiques sont présentées en partie 4.1.

L'homogénéisation des données mesurées dans des conditions similaires de référence est nécessaire pour comparer les valeurs records issues de plusieurs sites d'observations, ou les utiliser dans la démarche Eurocodes. **Ces conditions n'étant pas réalisées pour l'ensemble des anémomètres, il peut être nécessaire de procéder à des corrections de façon à normaliser les observations.**

Outre les contrôles qualité menés par Météo-France dans le cadre de la mesure et de la mise à disposition des données de vent, il convient de s'assurer que les mesures sont représentatives de conditions de références ou bien éventuellement directement représentatives du site d'étude.

Une telle correction peut être menée en déterminant pour chaque secteur de vent, des coefficients de rugosité, topographie et sillage. Un exemple de procédure de normalisation, utilisée pour l'établissement de la carte de l'annexe nationale de l'Eurocode 1-4 [20], est décrite en Annexe 5.

Il est important de ne pas confondre la procédure de normalisation, qui a pour but d'obtenir un vent de référence sur le site où sont prises les mesures, de la transposition des vents depuis la station Météo vers le site d'intérêt (recalage climatique présenté en partie 4.4.1).

2.2. Neige

La description des phénomènes couvre en plus de la neige, les phénomènes de verglas, pluie verglaçante et de givre. Concernant les observations de neige, des aspects généraux concernant les réseaux de mesure de surface sont présentés en Annexe 3.

2.2.1. Phénomènes et conditions météorologiques

2.2.1.1. Formation de la neige et autres hydrométéores associant la phase solide de l'eau

La neige est une précipitation solide en flocons qui se forment dans un nuage par agrégation de cristaux de glace et atteignent le sol lorsque la température de l'air est négative ou voisine de 0°C. Leur forme varie en fonction de la température et de l'humidité au sein du nuage. On distingue 3 formes types : les étoiles, les plaquettes, les aiguilles et colonnes. Sous nos latitudes, la neige tombe en plaine par une température sous abri le plus souvent comprise entre -5°C et +1°C.

Les paramètres déterminant la qualité de la neige sont non seulement la température près du sol, mais également l'humidité de l'air, le vent et la température sur plusieurs kilomètres d'épaisseur de la masse d'air où elle s'est formée.

La neige se forme en altitude et évolue au sein des masses d'air qu'elle rencontre lors de sa chute ; si la température de l'air devient positive à moins de 300 m du sol, les flocons n'ont pas le temps de fondre et ils atteignent le sol ; c'est pourquoi des chutes de neige sont également possibles avec des températures comprises entre +1°C et +3°C.

À l'inverse, si les flocons de neige rencontrent au cours de leur chute une épaisse couche d'air à température positive puis à nouveau de l'air à température négative près du sol, il peut alors pleuvoir par température négative. Il s'agit alors de pluie verglaçante, qui peut constituer un danger plus important que la neige, car l'eau en surfusion gèle au contact de tout matériau (fils électriques, arbres) et du sol provoquant des effets de surcharge ainsi bien sûr que des risques de perte d'adhérence.

On distingue classiquement trois types de neige selon la quantité d'eau liquide qu'elle contient : la neige sèche, la neige humide et la neige mouillée :

La neige sèche ne contient pas (ou extrêmement peu) d'eau liquide. Légère et poudreuse, elle s'observe généralement par température nettement inférieure à 0°C et se rencontre fréquemment en montagne ou en plaine lors des grandes vagues de froid. Cette neige sèche peut être très sensible aux effets du vent pour créer des congères de grande dimension comme observées lors de l'évènement de mars 2013 en Normandie.

La neige humide, ou collante, tombe par température voisine de 0°C. Elle contient un peu d'eau liquide, ce qui la rend pâteuse et assez lourde. C'est la plus fréquente en plaine. La neige collante adhère très facilement à tout ce qu'elle rencontre en tombant : câbles électriques, caténaires de la SNCF, etc. Lorsqu'il en tombe plusieurs centimètres, elle provoque de sérieux dégâts : sous le poids de cette neige lourde, les toitures et les serres peuvent s'effondrer et les branches des arbres se rompre. Ce type de situation est assez fréquent dans le sud de la France. Une chute de seulement quelques centimètres suffit elle aussi à perturber gravement le trafic routier, ainsi que les circulations aérienne et ferroviaire.

La neige mouillée tombe par température nettement positive (entre +1°C et +3°C) et contient, pour cette raison, beaucoup d'eau liquide. Très lourde, elle est facilement évacuée par le trafic routier, mais peut aussi fondre puis regeler sous forme de plaques de glace.

Verglas, pluie verglaçante, givre et brouillard givrant

Le verglas est lié à une précipitation : c'est un dépôt de glace compacte provenant d'une pluie ou bruine qui se congèle en entrant en contact avec le sol. La température du sol est généralement voisine de 0°C, mais elle peut être légèrement positive. Le verglas est plutôt rare sur nos routes, par rapport aux formations de givre ou au gel de l'eau issue de neige fondante.

La pluie verglaçante se produit en cas de pluie ou bruine par température négative (état dit « de surfusion »). Lorsque ces gouttes d'eau surfondue se déposent sur un sol (ou un objet) dont la température en surface est inférieure ou égale à 0°C, elles gèlent instantanément et forment un dépôt de glace compact et lisse : le verglas.

Le givre est un dépôt de glace qui forme un revêtement opaque et granuleux autour des surfaces solides lorsque la température de l'air qui les environne est inférieure à 0 °C . À pareille température, les particules d'eau en suspension dans l'atmosphère peuvent néanmoins rester liquides sous forme de gouttelettes à l'état de surfusion, flottant le plus souvent dans un nuage ou un brouillard ; cet état est instable, et au moment où l'eau liquide est captée par des surfaces solides telles que le sol, la végétation, les objets, les aéronefs, elle se transforme en givre.

Le brouillard givrant se produit lors de la formation d'un brouillard à température négative : alors, les gouttelettes d'eau dont il est composé sont en état de surfusion et gèleront instantanément au contact des objets de toute nature qu'enveloppe le brouillard — végétation, lignes électriques, etc. ; ces objets seront ainsi

couverts de givre, d'où l'appellation de brouillard givrant. À l'image des précipitations verglaçantes, ce type de brouillard présente un péril pour la circulation automobile en sus de la mauvaise visibilité qu'il entraîne.

2.2.1.2. Conditions météorologiques propices

Une situation à neige associe généralement une perturbation avec deux masses d'air en conflit, de l'air froid d'un côté, de l'air doux et humide de l'autre. Pour prévoir la neige et déterminer sa qualité, les prévisionnistes devraient d'une part évaluer l'activité et l'évolution de la perturbation, d'autre part estimer le plus précisément possible les températures de l'air et du sol. La prévision devient difficile lorsque la température avoisine 0 °C car l'eau peut facilement et rapidement passer de l'état liquide à l'état solide et inversement.

Enfin, la prévision de la neige en plaine ne concerne pas seulement celle des chutes de neige. Elle englobe aussi celle de l'évolution de la couche déjà déposée : son maintien au sol, sa fonte, son regel possible si elle est humide et la formation de plaques de verglas, l'évolution de son épaisseur et de sa qualité, la durée et la vitesse d'évolution entre ces différents états.

En France, les épisodes de pluies verglaçantes se produisent généralement durant une période de transition, lorsqu'un redoux succède à un temps froid persistant. Lors de ce changement de temps, l'air froid, situé dans les premières couches de l'atmosphère au contact du sol, stagne. Cet air plus dense a du mal à s'évacuer alors que l'air se radoucit en altitude. En tombant, les gouttelettes se refroidissent considérablement en traversant la pellicule d'air froid jusqu'à atteindre l'état de surfusion. Le verglas cause des perturbations en rendant le réseau routier impraticable mais aussi, par accumulation, à la végétation, aux fils électriques ou aux avions.

L'effet de lac

L'expression « effet de lac » ou « lake effect » est originaire des États-Unis, où l'on observe fréquemment, dans certaines régions proches des Grands Lacs, de fortes chutes de neige localisées dans le temps et dans l'espace. Ce phénomène survient lorsqu'une masse d'air polaire continentale, froide et sèche, est rendue instable par son passage au-dessus d'une surface maritime plus douce.

Le mécanisme physique en jeu, appelé « suradiabatisation », peut également être observé en France, le plus souvent près des côtes de la Manche, où de fortes chutes de neige peuvent se produire localement. Lors de l'hiver 2009/2010, on avait relevé jusqu'à 60 cm dans le Cotentin et 50 cm dans les Côtes-d'Armor en quelques jours, entre le 5 et le 10 janvier²².

Lors de vagues de froid hivernales, de l'air froid stationne sur le continent. Suivant la direction des vents, cette masse d'air initialement très stable peut être poussée au-dessus de surfaces maritimes au contact desquelles elle va se réchauffer et s'humidifier. Le fort contraste thermique entre la surface maritime, « chaude », et la masse d'air froide qui la survole génère de la convection. Les averses apportent parfois de la pluie froide et, plus fréquemment, du grésil ou de la neige. L'intensité des averses dépend de deux facteurs : la distance parcourue par la masse d'air au-dessus de l'eau et la présence plus ou moins importante d'air froid en altitude.

Les averses sont en général très localisées. Elles ont tendance à s'organiser en lignes stationnaires suivant la direction du vent. Selon son intensité, des congères peuvent en outre se former. Lorsque les averses pénètrent à l'intérieur des terres, au contact des surfaces froides, elles ne sont plus alimentées en énergie à leur base et s'atténuent progressivement.

L'effet de lac peut se produire lorsqu'une masse d'air très froid stationne sur le continent européen pendant une vague de froid. Des vents de nord, nord-est ou est, peuvent être à son origine, principalement près des côtes de la Manche, notamment en Bretagne et Normandie. Les cumuls sont souvent les plus importants dans le Cotentin, le bocage normand et l'intérieur des Côtes-d'Armor. Fin février/début mars 2005, les côtes de la Manche avaient été concernées par un épisode de ce type, avec 40 à 60 cm dans le bocage normand et des congères de 1 m.

²² <https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/precipitations/leffet-de-lac>

De tels évènements peuvent aussi être observés le long des côtes aquitaines, sur le Pays basque, quand le vent prend une composante nord-ouest, surtout sous forme orageuse. La neige y est alors plus rare, mais l'activité pluvieuse voire orageuse (avec grésil) importante.

La Corse n'est pas épargnée : lorsque de l'air glacial en provenance d'Europe centrale s'infiltré sur l'Italie, la façade orientale de l'île peut recevoir des chutes de neige jusque sur les plages et de grosses quantités à basse altitude sur le relief.

Chez nos voisins suisses, un tel phénomène peut aussi se produire sur les rivages du lac Léman²³.

Aux Etats Unis, le National Weather Service (NWS) dispose d'une alerte Lake Effect Snow advisory déclinable en Lake Effect Snow warning. Les villes d'Erie, NY ou Buffalo, NY sur les rives du Lac Erie sont particulièrement soumises à ce phénomène (tout comme Watertown, NY sur les rives du Lac Ontario). Un record de 77 pouces (196 cm) en 24 h sont tombés ainsi le 11/01/1997 à Montague Township, NY²⁴. Parfois, on peut même observer des éclairs sous les effets de lacs les plus intenses. On parle alors de *thundersnow*.

Retour d'Est

Les perturbations qui affectent la France se déplacent généralement d'Ouest en Est. Mais dans quelques cas particuliers, la circulation atmosphérique est inversée et les perturbations touchent notre pays depuis l'Est : on parle alors de retour d'Est.

Cette situation se produit lorsque les hautes pressions sont situées à des latitudes plus au nord que d'ordinaire. Elles empêchent la circulation des perturbations océaniques classiques sur l'Europe de l'Ouest, qui n'ont d'autre choix que de contourner cet anticyclone très au nord puis de revenir par l'Est sur notre pays.

Cette configuration est appelée « situation de blocage » car ce puissant anticyclone résiste plusieurs jours.

Les retours d'Est sont associés à une « goutte froide » d'altitude, c'est-à-dire une poche d'air froid venue s'isoler sur la France ou la Méditerranée en altitude.

L'interaction entre l'air froid d'altitude et l'air relativement doux et humide de surface sur la Méditerranée donne naissance à des perturbations actives.

En hiver, comme le vent vient de l'Est, il est chargé d'air froid continental. Cette situation favorise les épisodes de neige avec des chutes potentiellement abondantes survenant sur un large territoire, y compris sur les régions méditerranéennes.

2.2.1.3. Climatologie des chutes de neige

Les chutes de neige précoces en plaine

L'automne est une période de contrastes en France. Les masses d'air chaudes encore présentes sur le pays en début de saison sont progressivement confrontées à des masses d'air de plus en plus froides issues des régions polaires. Celles-ci se constituent au fil des semaines autour du pôle Nord qui reçoit de moins en moins d'énergie solaire. Selon les configurations météorologiques, lorsque le flux prend une composante nordique, ces masses d'air polaires peuvent descendre brutalement sur l'Hexagone, provoquant des chutes de neige jusqu'en plaine. Sans surprise, ce sont les régions au climat le plus continental, du Centre-Est au Nord-Est, qui sont souvent concernées en premier.

Un phénomène exceptionnel jusqu'à la mi-octobre :

Les chutes de neige en plaine sont rarissimes en septembre, même si un épisode a été consigné dans les archives sous le règne de Louis XV, dans la nuit du 29 au 30 septembre 1764. On avait alors mesuré une quinzaine de centimètres de neige sur les hauteurs de la Loire et du Rhône.

²³ "Lake effect snow" sur le Léman - MétéoSuisse (admin.ch), vidéo d'un tel phénomène : <https://www.youtube.com/watch?v=d1nCEaFC3L0>

²⁴ Quelques liens illustrant le phénomène : <https://www.weather.gov/safety/winter-lake-effect-snow>, <http://lakeeffectliving.com/wordpress/lake-effect-snow/>, <https://www.youtube.com/watch?v=8yZ9Ry4x2Yk>, <https://www.youtube.com/watch?v=J4K6E-SIWs>

Durant la première quinzaine d'octobre, la neige reste exceptionnelle et concerne plutôt les régions de l'Est. Des chutes de neige ont, par exemple, été observées à Lyon, le 8 octobre 1936 (un coup de froid exceptionnellement précoce s'était produit du 6 au 12). En 1975, un épisode neigeux remarquable s'est produit entre le 10 et le 14 octobre, avec de la neige à Nancy et Metz le 11, à Langres le 13 (4 cm) et de la pluie et neige mêlées à Orly ou encore à Gourdon (Lot) le 10.

Les neiges précoces d'octobre du 21^e siècle :

D'autres épisodes neigeux précoces se sont produits ces dernières années. Parmi eux, celui des 23 et 24 octobre 2003, notamment sur la plaine d'Alsace, avec 1 cm au sol à Bâle-Mulhouse. En 2008, le 30 octobre, il a neigé de la Basse-Normandie à la Mayenne et la Sarthe, avec 10 cm relevés au Pré-en-Pail (Mayenne) et 5 cm à Laval. Enfin, les 27 et 28 octobre 2012, il est tombé 15 à 20 cm sur l'ouest de Grenoble et des flocons ont été observés jusqu'en Provence, sous un mistral tempétueux.

Les chutes de neige de novembre 1980 :

L'épisode du 4 au 5 novembre 1980 reste une référence en matière de précipitations neigeuses précoces, notamment par son étendue géographique. La neige était cette fois tombée en quantité exceptionnelle sur une large partie du pays, jusque dans le Sud. À cette occasion, l'épaisseur de neige au sol avait atteint : 50 cm à Aubenas (Ardèche), 30 cm à Clermont-Ferrand, 26 cm à Vichy, 5 cm à Nîmes et 3 cm à Carcassonne. Il avait aussi neigé abondamment au même moment en Bretagne avec 21 cm à Rostrenen (Côtes d'Armor) et 17 cm à Dinard.

La neige dans les régions Méditerranéennes :

La neige dans les régions méditerranéennes n'est pas si rare que l'on pourrait le penser. Sur 32 hivers (1970-71 à 2001-2002), on relève ainsi 25 épisodes majeurs, avec une hauteur de neige au sol supérieure à 10 cm à basse altitude dans les régions Languedoc-Roussillon²⁵ et Provence-Alpes-Côte d'Azur. On y a également enregistré des hauteurs de neige au sol supérieures à 50 cm à moins de 500 m d'altitude en 1970, 1981, 1986, 1992 et 2001. La neige, souvent de type « mouillée » dans ces régions, peut ainsi paralyser ces départements peu habitués à y faire face. Par ailleurs, lorsque la neige est sèche ou peu humide, le mistral favorise la formation de congères, catastrophiques pour le réseau routier.

Les chutes de neige tardives en plaine

De même, des chutes de neige tardives en plaine peuvent être observées de manière fréquente jusqu'au mois d'avril. Les chutes de neige en mai sont rarissimes mais pas exceptionnelles en première quinzaine de mai. Il s'agit alors essentiellement de chutes de flocons de neige ne tenant pas au sol. On notera ainsi les épisodes du 7 mai 1997 à Tours et du 4 mai 2010 à Carcassonne.

2.2.1.4. Masse volumique associée aux hauteurs de neige

La densité de la neige fraîche dépend à la fois du type de cristaux et de la température. Elle peut varier de 0,02 (soit une masse volumique de 20 kg/m³) pour une neige d'hiver très froide et très légère dans les régions polaires, à des valeurs proches de 0,3 (soit une masse volumique de 300 kg/m³) pour une neige très humide²⁶. Il convient ici de rappeler que, à la température de 0°C et à pression atmosphérique normale (1 013 hectopascals), la glace ordinaire a une densité d'environ 0,9 et que la faible densité relative de la neige tient au fait qu'elle contient de grandes quantités d'air.

La valeur moyenne qui est généralement associée à une couche de neige fraîche à nos latitudes est de l'ordre de 0,1 (soit une masse volumique de 100 kg/m³), c'est-à-dire qu'un manteau neigeux de 10 centimètres de hauteur, une fois fondu, laissera la place à une couche d'eau liquide haute de seulement 1 centimètre.

²⁵ Dans le découpage régional antérieur à 2016 (faisant aujourd'hui partie de l'Occitanie).

²⁶ Le lecteur pourra aussi se référer au tableau indicatif donnée par l'Eurocode 1-3 (cf. § 3.3.2).

Mais la densité évolue dans le temps, en fonction de l'humidité de la neige, de son tassement et du poids des couches supérieures. En principe, elle augmente avec la profondeur, et, dans les couches profondes, elle peut atteindre des valeurs supérieures à 0,6 notamment dans les névés en début d'été en haute montagne. Il existe toutefois des situations où certaines couches profondes sont moins denses que les couches adjacentes supérieures.

Météo-France ne réalise pas d'observation du poids de la neige de façon opérationnelle.

A noter que de façon ponctuelle, des carottages ont pu être fait pour certains épisodes de neige. A titre indicatif, des charges d'environ 110 kg/m² pour une hauteur de 48 cm ont pu être observées à Carcassonne le 24 janvier 1992, ce qui correspond à une densité de 230 kg/m³, l'explication donnée à cette valeur est liée à des précipitations qui ont suivi l'épisode de neige et qui ont tassé et alourdi la couche de neige existante [23].

Sur l'épisode de neige de décembre 1990, l'article de la Houille Blanche [25] indique une masse volumique qui augmente au fil des jours par tassement du manteau neigeux jusqu'à dépasser 200 kg/m³ dans l'Ain, l'Isère et très localement dans l'Est Lyonnais.

La reconstitution de la masse volumique de la neige est également possible par l'utilisation de chroniques de hauteur de neige associées à des estimations de masse volumique totale du manteau neigeux issues de la modélisation (grandeur intensive correspondant au rapport équivalent en eau / hauteur totale du manteau). La méthode consiste à simuler le manteau neigeux à l'aide du modèle détaillé de manteau neigeux Crocus couplé au modèle de surface continentale ISBA (SURFEX/ISBA-Crocus) [26], alimenté par la réanalyse SAFRAN (cf. 5.3).

Compte tenu des incertitudes pesant sur les estimations de précipitation solide et de la variabilité naturelle de l'enneigement, il est attendu que les hauteurs de neige simulées par SAFRAN à la résolution de 64 km² soient différentes des hauteurs de neige mesurées dans les stations du réseau de mesure de Météo-France et de ses partenaires. Néanmoins, la masse volumique totale du manteau neigeux (obtenue en divisant la masse totale de neige par unité de surface par la hauteur totale du manteau neigeux), en tant que variable intensive (c'est-à-dire indépendante de la taille du système étudié), est sujette à de bien moindres incertitudes. Les simulations numériques permettent donc de disposer d'estimations de cette variable.

2.2.2. Neige et changement climatique

2.2.2.1. Evolution passée

L'évolution des chutes de neige en plaine est difficile à caractériser pour plusieurs raisons. Différentes mesures existent pour caractériser le phénomène, la complétude et la qualité des données observées sont faibles dû à l'évolution des modes opératoires, à la fermeture de stations avec observation humaine, et à la qualité médiocre pour l'instant des capteurs automatiques. Il existe finalement peu de séries d'observations robustes pour analyser l'évolution du phénomène sur plusieurs décennies en termes d'occurrence de neige ou de hauteur de neige au sol.

Ainsi les approches par réanalyse, comme la réanalyse SIM²⁷, sont utilisées pour reconstituer les records passés. La neige est alors estimée à partir des autres paramètres (précipitations, températures...). La qualité du résultat est difficile à appréhender (comparaison d'une station par rapport à une maille modèle, incertitude déjà évoquée sur la qualité des observations elles-mêmes).

Sur 22 postes d'observation d'occurrence de neige sur la période 1949-2014, on peut regarder le changement en nombre de jours, et le changement relatif en % par rapport à la valeur de 1949. Sur ces 21 postes, 13 indiquent une baisse significative, 7 une baisse non significative, et 2 une hausse non significative

Sur 31 postes pour lesquels le maximum de hauteur de neige est disponible pour la période 1949-2014, 7 indiquent une baisse significative, 24 une baisse non significative.

²⁷ Safran-Isba-Modcou, cf. partie réanalyse au § 2.2.3.2

À partir d'indicateurs départementaux de modélisation hydrologique (SIM) entre 1959 et 2018, on observe :

- une baisse significative sur plus de la moitié des départements du nombre de jours avec une moyenne des précipitations solides > 1mm, et une baisse non significative presque partout ailleurs,
- une baisse significative sur la quasi-totalité du pays du nombre de jours avec une moyenne des fractions du sol recouvert de neige > 20 %,
- une baisse significative sur la très grande majorité du pays du nombre de jours avec une moyenne des hauteurs de neige au sol (à 6 heure du matin) > 1cm,
- une baisse significative sur la très grande majorité du pays du nombre de jours avec une moyenne des hauteurs quotidiennes maximales de neige au sol > 1 cm.

2.2.2.2. Evolution attendue en climat futur

L'évolution du manteau neigeux en montagne a été plus étudiée que celui de plaine et il a été montré des réactions multiples aux effets du changement climatique. De petites variations de température suffisent à perturber significativement la répartition des précipitations entre pluie et neige au cours de l'hiver [27]. Des températures plus élevées sont généralement associées à une fonte précoce de la couverture neigeuse et à une diminution de son étendue et de son épaisseur. Elles affectent également indirectement les débits des fleuves. De décembre à mars, le réchauffement se traduit par moins de neige et plus de pluie, menant à une augmentation des débits. De mars à juin, la diminution du stock nival conduit à une baisse du pic de fonte.

Les projections climatiques confirment la tendance à la baisse de l'enneigement, particulièrement à basse et moyenne altitude, pour tous les scénarios de concentration de gaz à effet de serre au 21e siècle, avec une distinction entre les scénarios à partir du milieu du 21e siècle. Elles indiquent aussi un maintien de la variabilité interannuelle des conditions d'enneigement²⁸. Toutefois, les hivers bien enneigés seront de plus en plus rares et les hivers peu enneigés de plus en plus fréquents.

2.2.2.3. Conclusion

Les chutes de neige extrêmes découlent de précipitations extrêmes survenant dans une plage de températures optimales légèrement inférieure à 0 °C. L'évolution de tels événements dépend donc à la fois des changements de précipitations extrêmes et de la probabilité de connaître une température dans la plage optimale [31].

Les tendances observées concernant l'occurrence et la hauteur de neige sont globalement en baisse.

Les tendances projetées concernant les hauteurs et les charges de neige montrent des évolutions globalement à la baisse, mais accompagnées d'une augmentation de la variance des extrêmes annuels [29] [30] [31][32]. Le manque d'assimilation des données d'observations, particulièrement en plaine, rend la qualité du résultat de ces études difficile à appréhender. Ces travaux de recherche restent donc à approfondir. Il serait donc nécessaire de consolider les études sur les tendances sur les extrêmes en plaine si on souhaite les prendre en compte dans l'évaluation de niveaux d'aléas extrêmes.

Dans le cadre de la sûreté nucléaire, le fait de ne pas tenir compte d'effet du changement climatique sur les hauteurs et les charges de neige apparait comme une démarche pragmatique et adaptée compte tenu de l'état des connaissances actuelles. Le GT préconise néanmoins une veille sur l'évolution des connaissances concernant l'impact du changement climatique sur la neige.

²⁸ L'étude de Croce (2021)[28] présente une inter-comparaison entre 9 couplages de modèles globaux et de modèles régionaux. Elle utilise les projections de l'équivalent en eau du manteau neigeux simulé et compare les charges de neige obtenues avec les scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. Il est observé une baisse globale des charges, expliquée par une baisse significative de la moyenne des maxima annuels contrebalancée cependant par une augmentation de la variance de ces maxima annuels. En complément de ces résultats, l'étude montre que pour certaines zones de plaine, d'extension limitée, les valeurs de charges cinquantennales apparaissent en augmentation dans le futur.

Diverses études [29][30] réalisées à la suite de fortes chutes de neiges dans le sud de la France et de l'Italie ont montré une augmentation du facteur de changement caractérisant les chutes de neige autour du bassin Méditerranéen en lien avec les effets du changement climatique.

Plus récemment, la thèse d'E. Le Roux [31][32] sur la modélisation non-stationnaire des extrêmes liés à la neige confirme ces résultats dans les Alpes françaises. Ces travaux présentent une méthode pour l'évaluation des extrêmes qui pourraient être reprise et développée pour des zones de plaine.

2.2.3. Observations et produits d'analyse

2.2.3.1. Observations

L'observation des précipitations neigeuses et de l'état du manteau neigeux peut être réalisée soit par intervention humaine (méthode traditionnelle), soit par des capteurs automatiques spécifiques tels que ceux progressivement mis en place par Météo-France au cours de la décennie 2010 (en particulier à la suite de la décision d'arrêt de l'observation humaine fin 2017, excepté sur 5 aéroports à enjeux : Orly, Roissy, Nice, Lyon-St-Exupéry et Bâle-Mulhouse).

La mesure humaine est réalisée manuellement soit dans les centres météos, soit par des observateurs bénévoles du réseau climatologique d'Etat (RCE).

L'observation humaine professionnelle

Les consignes relatives à l'observation de neige maximale ont évolué dans un passé récent selon les modalités suivantes.

Jusqu'en 2003, toutes les stations professionnelles de Météo-France (stations synoptiques) mesuraient l'épaisseur maximale quotidienne de la couche de neige chaque fois qu'il y avait de la neige au sol, c'est-à-dire « *l'épaisseur maximale de la couche de neige* » atteinte à un moment quelconque entre 0 et 24 heures ou pendant les heures « *d'ouverture de la station, lorsque le sol a été plus qu'à moitié couvert de neige* »²⁹.

A partir de février 2008, il a été décidé que le paramètre hauteur totale de la couche de neige ne serait renseigné « *toutes les heures que pendant l'ouverture de la station* ». De plus, « *les observations de hauteur totale de neige sont faites indépendamment du pourcentage de couverture neigeuse au sol* » et donc « *la restriction qui indiquait dans les textes antérieurs que la mesure de hauteur de neige fraîche et/ou totale ne s'effectuait que si le sol était plus qu'à moitié couvert par la neige ne s'applique plus* ». La valeur retenue pour le paramètre « hauteur de neige maximale en 24 heures » est donc désormais la valeur maximale quotidienne de ces données horaires.

A partir de 2009 de nombreux centres météorologiques ont fermé et l'observation humaine a progressivement été réduite. En septembre 2016, les modalités de l'arrêt de l'observation humaine à Météo-France ont été définies pour entrer en vigueur entre le 1^{er} juillet 2016 et le 31 décembre 2017 au plus tard selon les sites. Seuls 5 aéroports à enjeux, dont Orly, Nice et Bâle-Mulhouse ont poursuivi l'observation humaine au-delà de 2017. Sur le point particulier du paramètre neige, il est écrit : « *l'estimation des paramètres comme la hauteur de neige fraîche ou le poids de la neige n'est pas concernée puisqu'il s'agit d'une production ponctuelle.* »

En vertu de l'évolution de ces consignes, le nombre de postes produisant des données d'observation humaine de la neige utilisables à des fins climatologiques se révèle relativement réduit, et en diminution progressive sur les dernières années; ainsi, le calcul des durées de retour de hauteur de neige maximale en plaine effectué par Météo-France en 2010 [33] ne retenait que 128 postes pour lesquels des données fiables existaient sur la période 1945-2009, tandis que la réactualisation de ce rapport en 2019 [34] ne retenait plus que 58 postes pour la période 1945-2014 (carte ci-dessous).

²⁹ Notice climatologique, Météo-France, janvier 1982

Durées de retour des hauteurs de neige maximales en 24 heures 58 Stations sélectionnées – Période maximale: 1945–2014



Figure 12 : Localisation des 58 stations météorologiques mesurant la neige en France en 2019 [34]

Le réseau des observateurs du réseau climatologique d'Etat (RCE)

Le réseau des bénévoles est constitué mi-2021 de 1200 observateurs environ, dont une grande majorité effectue des mesures de hauteur de neige.

Il s'agit de la hauteur de neige totale (paramètre H_NEIGETOT et Q_NEIGETOT06 de la BDClime) mesurée à 8 h locales. Elle peut être complétée de la hauteur de neige fraîche tombée en 24 h (paramètre H_NEIGEF de la BDClime). Ces données sont saisies dans la BDClime et disponibles au plus tard le 22 du mois suivant.

Dans le cadre de l'automatisation du RCE, la saisie des données de hauteurs de neige totale et fraîche mesurées par les bénévoles est maintenue possible via l'interface web du projet Observation Participative en vue de l'alimentation de la BDM et de la BDClime.

Les différents capteurs de neige présents sur les stations Météo-France sont présentés en Annexe 3.2.

2.2.3.2. Produits d'analyse

Le produit HYDRE

Le produit HYDRE est un produit de discrimination des hydrométéores au sol obtenu toutes les 5 minutes par fusion de données, couvrant la France métropolitaine. Il est opérationnel depuis le 23/11/2016.

HYDRE repose sur des données de bases échantillonnées toutes les 5 minutes telles que la réflexivité, la probabilité de pluie, les dernières prévisions AROME ainsi que les données relatives au relief issu du modèle AROME également. A noter que le produit HYDRE permet également d'avoir des informations sur les pluies verglaçantes (profil type 5).

Il s'appuie sur un arbre de décision présenté ci-dessous :

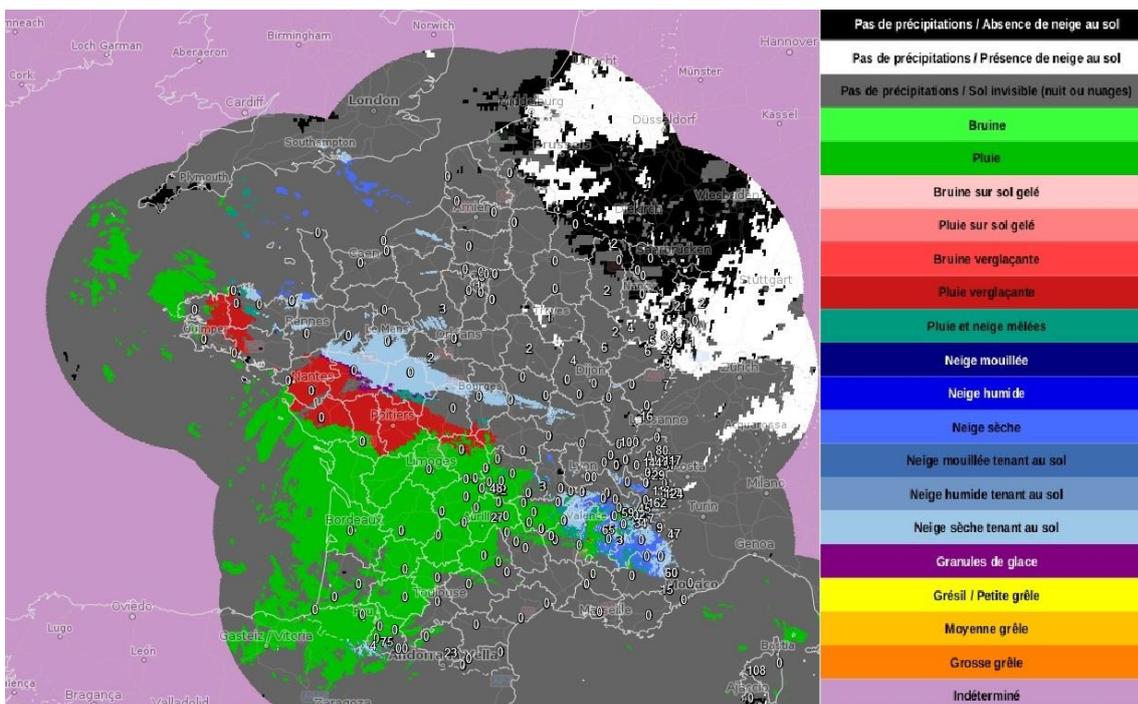
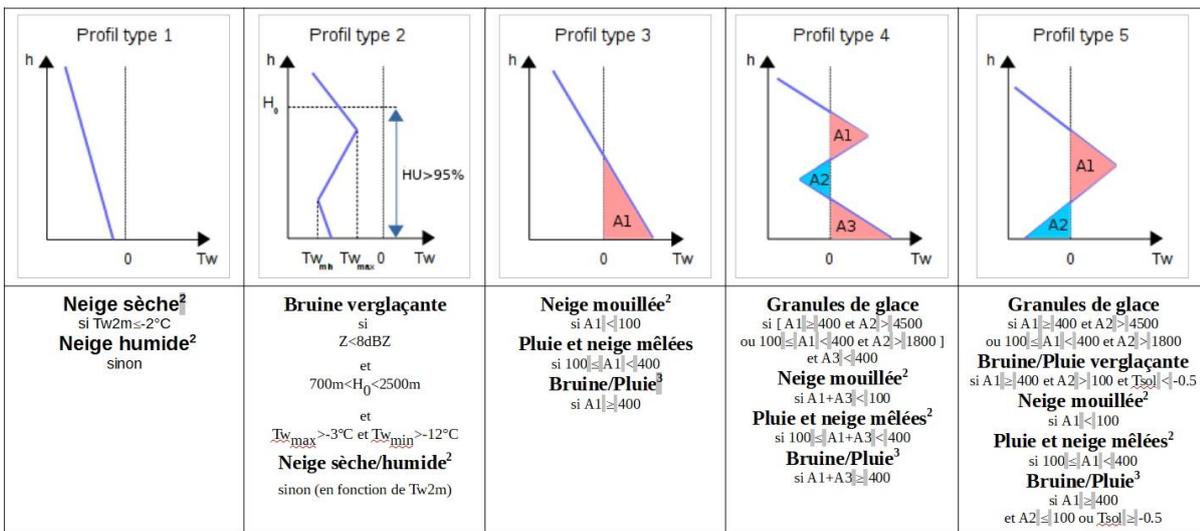


Figure 13 : Arbre de décision du produit Hydre permettant la discrimination des hydrométéores au sol

La réanalyse

Météo-France a développé à partir des années 1980 des modèles du manteau neigeux, en particulier pour des applications en montagnes. Ces modèles peuvent être intégrés dans des chaînes de calculs plus complètes et forcées par des observations pour mener des réanalyses de situations passées ou par des sorties de modèles pour mener des simulations météorologiques et climatiques.

Aujourd'hui, Météo-France utilise le système d'analyse SIM2³⁰ (SAFRAN – ISBA – MODCOU) composé de 3 modules :

- SAFRAN : système d'analyse des paramètres météorologiques par interpolation optimale entre les observations au sol et les ébauches issues des modèles météorologiques tels que ARPEGE ou le modèle du CEPMMT. Parmi les 8 variables analysées se trouvent les précipitations solides ;
- ISBA : schéma de surface alimenté par les variables issues de SAFRAN, pour établir un bilan d'énergie et d'eau à la surface et notamment analyser la présence, la hauteur et la densité de différentes couches de neige au sol. Il est opéré sur une grille de 8 km à l'échelle métropolitaine avec prise en compte de différentes altitudes dans les zones de montagne ;
- MODCOU : modèle hydrogéologique assurant le routage de l'eau vers les rivières ou la gestion des nappes souterraines.

Le système d'analyse SIM2 est opéré en temps réel deux fois par jour et bénéficie d'une réanalyse disponible depuis 1958 dont la performance au pas de temps quotidien pour la climatologie a été évaluée [46]. La réanalyse SIM2 permet ainsi de disposer de différentes données sur la neige à résolution quotidienne et spatiale 8 km sur la France : cumul précipitation solide (SAFRAN), hauteur et densité de la neige (ISBA)

Pour les principales chaînes de montagne françaises (Alpes, Pyrénées), la chaîne de modèle SAFRAN - SURFEX/ISBA-Crocus - MEPRA (S2M) permet d'avoir accès à 60 années de réanalyses des conditions météorologiques et de différentes variables décrivant l'état du manteau neigeux [47][48][49], au pas de temps journalier, ce qui est en fait un produit intéressant pour l'analyse fréquentielle des extrêmes neigeux.

La réanalyse météorologique SAFRAN [47] consiste en une spatialisation des données météorologiques (précipitation, température, humidité, radiation, vitesse du vent) selon les massifs et différentes altitudes. Dans un second temps, le modèle de manteau neigeux Crocus estime la hauteur de neige et la charge de neige à partir de ces séries SAFRAN. Crocus simule l'évolution du manteau neigeux en tenant compte de différents processus physiques tels que la diffusion thermique, les changements de phase et le métamorphisme. La réanalyse Safran-Crocus a été confrontée à de nombreuses observations, le plus souvent à des hauteurs de neige mesurées in situ et des données de télédétection du couvert neigeux. Par exemple, [50] compare les hauteurs de neige SAFRAN-Crocus à 79 séries de hauteurs de neige observées dans les Alpes françaises pendant la période 2010–2014, avec un biais moyen de 18 cm et une incertitude moyenne (écart-type) de 37 cm. Les évaluations de Crocus avec des mesures de charges de neige sont plus rares en raison de la plus faible disponibilité de ces observations, mais Crocus a montré de remarquables performances par rapport à d'autres modèles [51].

Dans la dernière décennie, les modèles régionaux du climat à convection explicite (convection-permitting regional climate models) ont été exploités afin de produire des simulations du climat à fine résolution spatiale (1–4 km), sur des périodes d'une dizaine d'année. Ces simulations représentent la convection profonde de manière explicite, de façon à simuler les événements convectifs locaux de manière réaliste [52]. En France, pour des petites échelles spatiales (de quelques km² à 100 km²), le modèle AROME améliore par exemple de manière claire l'intensité et la fréquence des événements extrêmes de précipitations ([53][54]) par rapport au modèle régional du climat CNRM-ALADIN pour lequel la convection est directement paramétrisée. L'utilisation du modèle AROME comme outil de réanalyse des observations passées (en remplacement de SAFRAN) ou comme modèle de simulations en climat futur (comme outil de descente d'échelle de modèles régionaux vers un modèle

³⁰ La chaîne SIM, utilisée depuis 2003 en opérationnelle à Météo-France a été remplacée par SIM 2 en 2016 (https://www.metsis.upmc.fr/~aqui-fr/private/Presentations/2016_10/5_AQUIFR_SIM2.pdf)

local) est donc prometteur pour les analyses des précipitations extrêmes, et donc des variables de neige extrêmes, en climat courant et en climat futur.

2.2.3.3. Records de neige observés

Comme indiqué précédemment, les séries de données de hauteurs de neige maximales en 24 heures sont hétérogènes avec depuis 1945, la disparition progressive de l'observation humaine à Météo-France et la mise en place, encore en cours, de capteurs de hauteur de neige sur des sites en plaine.

Avec les réserves précédentes, les records de hauteur de neige fraîche tombée en 24 h se situent entre 40 et 50 cm en plaine : 45 cm à Ambérieu le 5 décembre 1990, 45 cm à Bâle-Mulhouse le 4 mars 2006, 43 cm à Dijon le 12 janvier 1964.

De même, les records d'épaisseur maximale sont souvent compris entre 40 et 60 cm en plaine (toutes régions considérées) jusqu'à 74 cm à Grenoble en décembre 1990.

Dans le cadre des travaux du GT, une analyse des records disponibles a été menée et est présentée ci-après. Les records de neige au sol mesurée « Hneige » mesurés toutes les 24 h sur les stations Météo-France, complétée par quelques valeurs issues d'une étude Météo-France de 1993, sont représentés dans la carte ci-après (cf. Annexe 6).

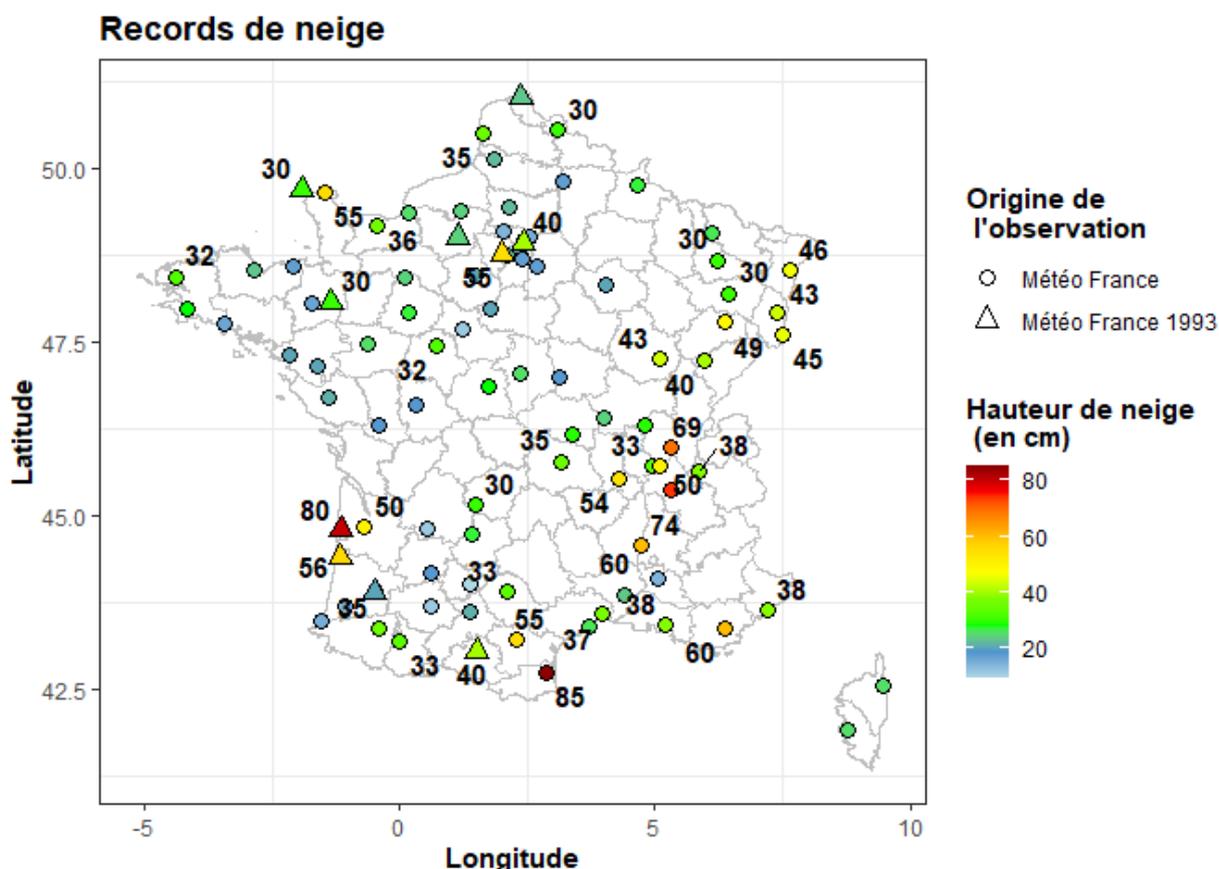


Figure 14 : Cartes des records de neige aux stations Météo-France³¹

Au cours des travaux du GT, il est apparu que d'autres données d'observation de neige, celles notamment du RCE (Réseau Climatologique d'Etat) sont contrôlées mais non exploitées. A titre exploratoire, Météo-France a transmis ces données dans le cadre du GT pour les départements de la Manche et de la Seine Maritime. Il s'agit de mesure de neige totale, prenant en compte l'accumulation lorsque l'épisode dure plusieurs jours.

³¹ Valeurs recensées en 2021 complétées de records recensés dans l'étude MF de 1993, observations limitées aux altitudes inférieures à 400 m.

Ces données ont été comparées avec des données issues du site Infoclimat qui fournit la base de données HistoriC (<https://www.infoclimat.fr/historic/>) qui a fait l'objet d'un travail de stage en 2020 à l'IRSN (cf. Annexe 6). Il est à noter que les sources et les vérifications faites sur les données recensées dans cette base ne sont pas bien tracées.

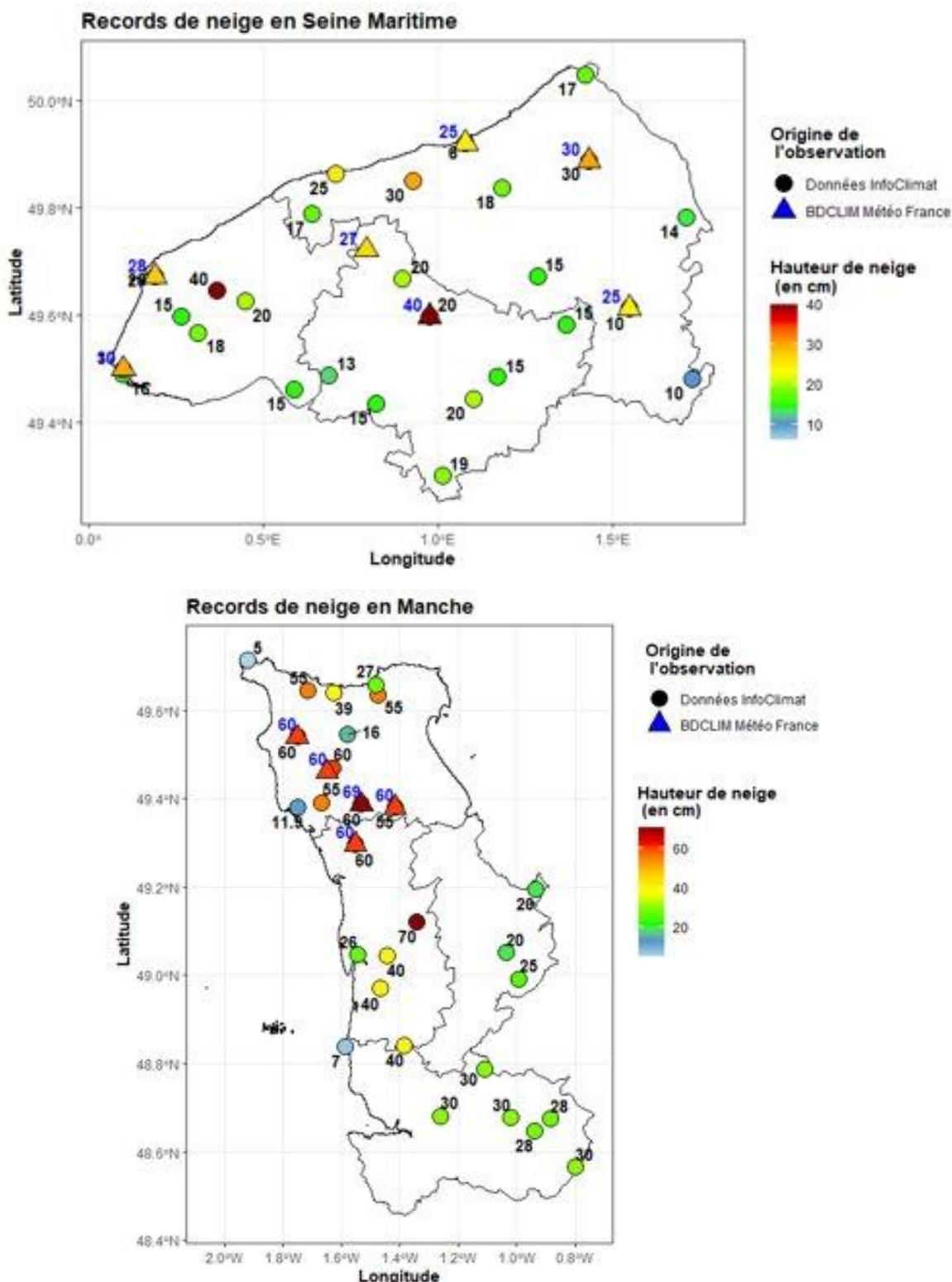


Figure 15 : Cartes des records de neige issus des Réseau Climatologique d'Etat pour les départements de la Seine Maritime et de la Manche

La comparaison entre les deux bases de données a montré que sur chaque zone :

- les deux bases de données se recoupent sur plusieurs stations,
- les records de la BDClim sont systématiquement plus élevés que ceux des mêmes stations tirées d'Infoclimat. Au vu des dates, ce ne sont pas nécessairement les mêmes événements.
- les valeurs records des zones des deux sources MF et Infoclimat sont proches.

A l'issue de cet exercice, le GT considère utile de mener des études approfondies sur les niveaux de neige historiques ayant pu être observés sur des stations du Réseau Climatologique d'Etat et sur des sites recueillant diverses sources d'information, dont la qualité est à analyser, telles que la base de données HistoriC de l'association Infoclimat.

2.2.4. Conclusion sur les données de neige à prendre en compte pour la caractérisation de la neige

Sauf exceptions, les mesures de neige faites en France par Météo-France sont des mesures de hauteur de neige. Les échanges dans le GT ont permis de bien différencier les accumulations de hauteurs de neige fraîche en 24 h des observations concernant des hauteurs de neige maximum en 24 h (« Hneige »), qui sont des mesures de neige totale, prenant en compte l'accumulation lorsque l'épisode dure plusieurs jours.

La caractérisation de la neige à partir d'observations est en pratique menée à partir de hauteurs de neige maximum en 24 h (prenant donc en compte l'accumulation lorsque l'épisode dure plusieurs jours). Cela est cohérent avec les pratiques identifiées dans les études de caractérisation de la neige menées par Météo-France et plus globalement recensées par le GT.

En termes de quantité et de qualité des données d'observation disponibles, l'étude Météo-France [34] montre que les consignes relatives à l'observation des hauteurs de neige maximales en 24 heures ont évolué à partir des années 2000 mais surtout depuis 2009, de nombreux centres météorologiques ont fermé et l'observation humaine a progressivement disparu dans d'autres centres. En 2019 seuls 58 postes ont pu faire l'objet d'une étude statistique de caractérisation (contre 128 en 2010). **Le GT relève que cette diminution globale du nombre de séries d'observations de neige risque de ne plus permettre de disposer de séries d'observations à proximité des sites nucléaires.**

La partie 5 du rapport précise les limites associées à l'utilisation des données d'observation de neige pour l'évaluation d'un niveau d'aléa WENRA ainsi que les perspectives apportées par les approches par réanalyse et simulation du manteau neigeux qui permettent d'accéder directement aux variables d'intérêt que sont la densité ou la charge de neige.

2.3. Combinaisons possibles de phénomènes naturels

Compte tenu des éléments de cadrage donnés (partie 1.1 et Annexe 1), le GT Vent et Neige a documenté l'état des connaissances concernant les dépendances entre les aléas Neige et Vent et d'autres aléas météorologiques. Ces éléments permettent d'alimenter la réflexion concernant les « conditions d'analyse » d'origine naturelle (cf. schéma en Annexe 1).

En 2014, Météo-France avait rédigé en collaboration avec l'IRSN, des fiches sur les aléas climatiques. Une des fiches concernait les aspects généraux [55] et présentait des possibilités de concomitances entre agressions climatiques, en prenant en compte des successions possibles d'événements au sein d'un épisode météorologique. Ces éléments, présentés dans le tableau ci-dessous, constituaient des éléments généraux, sans traitement particulier des phénomènes extrêmes.

Tableau 3. Possibilités et conséquences de concomitances entre agressions climatique

	Températures chaudes	Températures froides	Vent	Neige	Grêle	Pluie	Brouillard
Températures chaudes		non	possible	non	possible	possible	non
Températures froides			effet sur température ressentie	oui	fonte grêle ralentie	pluie verglaçante	givrage
Vent				blizzard	grêle horizontale	possible	possible
Neige					non	neige humide	possible
Grêle						probable	possible
Pluie							possible

A noter que le terme « blizzard » n’est pas adapté pour qualifier les évènements de neige et vent en France, car il s’agit d’un terme décrivant un phénomène américain. La notion de “tempête de neige” est plus appropriée au climat de la France tout en recouvrant le possible cumul de ces deux aléas climatiques.

L’étude [14] sur l’interdépendance des actions climatiques présente dans la partie « 3.5. Cross-correlation of climatic data », support aux travaux des Eurocodes, quelques éléments sur l’interdépendance entre aléas climatiques. L’objectif de cette partie est de vérifier l’hypothèse d’indépendance entre les actions climatiques retenues dans la définition des combinaisons de charges pour la conception des structures.

Sur le sujet de l’interdépendance entre neige et vent, le document [14] identifie une étude menée en Norvège sur des données de vent moyen 10 min et de neige (sous forme de hauteur d’eau équivalente) entre 1990 et 2019 sur 3 sites représentatifs de conditions climatiques distinctes. Ces variables apparaissent asymptotiquement indépendantes, avec une légère corrélation positive observée sur un des trois sites. Des analyses similaires ont été faites en Allemagne, à des altitudes différentes de 446 et 607 m. Sur ces autres sites, on observe une indépendance des variables représentant la neige et le vent.

Ces éléments corroborent une étude ancienne menée par M. Bedel (Météo-France) dans les années 1970 [56] sur la simultanéité de présence de neige au sol importante et de vent violent. A partir des 20 années d’observations disponibles à l’époque sur 12 stations de basse altitude, situées sur la moitié nord de la France, la note conclut que la distribution de la vitesse du vent peut être considérée comme indépendante de l’épaisseur de neige au sol. Le risque de constater simultanément des fortes valeurs de neige et de vent est très faible (période de retour empirique de 150 ans sur la station la plus pénalisante (Caen), pour l’observation conjointe de plus de 20 cm de neige et de 30 m/s de vent³²).

Sur le sujet de l’interdépendance entre vent et températures, une étude similaire à celle présentée ci-dessus a été menée sur les mêmes stations de Norvège et d’Allemagne. L’étude conclut que les variables vent et températures sont asymptotiquement indépendantes et qu’une faible corrélation négative est observée : les vitesses du vent fortes semblant généralement concentrées dans une plage de températures autour de 10°C.

Sur le sujet de l’interdépendance entre neige et températures, la dépendance attendue entre les variables est bien observée. La dépendance pour les extrêmes n’est pas complète, cela s’explique par le fait que les valeurs extrêmes de neige et de température minimum ne sont généralement pas obtenues le même jour.

En conclusion, l’étude [14] indique une indépendance statistique entre les variables climatiques étudiées sur la base des sites étudiés. Elle souligne que les résultats présentés ne sont qu’une illustration d’une méthodologie d’étude proposée et que l’analyse devrait être étendue à l’ensemble du territoire européen pour obtenir une conclusion plus générale sur la corrélation croisée des actions climatiques.

Il est apparu difficile au GT de documenter les évènements météorologiques associant vent et neige (pas de base de données des évènements associant le vent et la neige à Météo-France). De tels évènements ont été identifiés (vallée du Rhône notamment) mais il ne semble pas qu’il y ait de lien de dépendance particulier entre eux. L’évènement neigeux de mars 2013 apparait ainsi exceptionnel par le fait que les aléas vent et neige

³² a priori il s’agit de la vitesse de pointe

étaient particulièrement forts. Cet événement illustre le fait que cette simultanéité est possible mais sans que des probabilités de survenue conjointe aient été évaluées.

En lien avec cet état des connaissances, les réflexions/préconisations relatives aux conditions d'analyse liées à l'installation sont documentées en conclusion de la partie 3.3.

3. PRISE EN COMPTE DES AGRESSIONS VENT ET NEIGE SUR LES STRUCTURES DE GENIE CIVIL

Cette partie présente des aspects généraux concernant la prise en compte des agressions vent et neige sur les structures de génie civil. Elle a été rédigée conjointement par l'IRSN, le CTICM, H. Ducloux (RTE) et les exploitants.

Les exigences de comportement des structures prises en compte dans les Eurocodes ainsi que dans les démonstrations de sûreté nucléaires sont détaillées au paragraphe 3.1.

L'approche d'analyse semi-probabiliste des Eurocodes, prenant en compte les effets des actions et des résistances des matériaux ainsi que les combinaisons d'actions sont ensuite exposées paragraphe 3.2.

Enfin, le paragraphe 3.3 présente les « conditions d'analyse » actuellement retenues par les exploitants pour ce qui concerne les phénomènes naturels associés aux niveaux d'actions accidentelles qu'ils retiennent actuellement pour le vent d'une part et la neige d'autres part.

3.1. Exigences de comportement des structures

Les ouvrages nucléaires s'appuient sur une démarche spécifique issue d'une analyse de risques. La démarche du génie civil nucléaire consiste à traduire les exigences de sûreté découlant des fonctions fondamentales de sûreté auxquelles participent les ouvrages de génie civil en exigences de conception et de dimensionnement.

Les exigences à satisfaire dépendent directement des fonctions de sûreté liées aux spécificités de la technologie nucléaire (confinement, protection radiologique, maîtrise de la sous-criticité...).

Ainsi, le dimensionnement des ouvrages nucléaires est fondé sur le respect des exigences de comportement qui leurs sont attribuées en fonction de leur participation à la sûreté de l'installation (par exemple le confinement des produits radioactifs ou le supportage des matériels importants pour la sûreté), de leur nature, de leur rôle fonctionnel, ainsi que de l'aménagement de l'installation.

Il est distingué :

- 1) les ouvrages de génie civil devant faire l'objet d'un dimensionnement à l'égard des aléas climatiques du fait qu'ils :
 - assurent ou concourent au maintien d'une fonction de sûreté requise,
 - assurent un rôle spécifique de limitation des rejets à l'égard du risque de dissémination de produits radioactifs vers l'environnement,
 - supportent ou protègent des matériels qui assurent ou concourent au maintien d'une fonction de sûreté requise.
- 2) les ouvrages de génie civil ne participant pas à la sûreté de l'installation à l'égard des aléas climatiques et pour lesquels seule est requise l'absence d'agression de leur part des matériels et des ouvrages de génie civil relevant du paragraphe précédent.

Les exigences de comportement peuvent se décliner à partir d'exigences d'étanchéité (participation au confinement, rétention de liquides), de stabilité (résistance mécanique, supportage de matériel), de géométrie (maintien de la sous-criticité), d'absence d'interaction entre des ouvrages ou des éléments proches.

Les exigences de comportement couramment attribuées aux ouvrages de génie civil sont :

- la stabilité d'ensemble d'un ouvrage (absence d'effondrement généralisé),
- la stabilité locale (des éléments structuraux ou non structuraux considérés individuellement),
- le supportage des matériels,
- la participation au confinement des produits radioactifs,
- la garantie de maintien de la sous-criticité,
- l'absence d'interaction préjudiciable avec un ouvrage mitoyen (non-agression).

Sur la base des exigences de comportement retenues, la démarche de conception et de dimensionnement se poursuit avec la définition de méthodes et critères de justification, valant conditions suffisantes pour démontrer le respect des exigences de comportement et choisis en cohérence avec les codes et normes relatifs aux procédés de construction mis en œuvre.

Ils peuvent par exemple s'exprimer en termes de :

- limitation des déformations réversibles ou irréversibles des matériaux ;
- limitation des contraintes dans les matériaux ;
- limitation des déplacements pour garantir le maintien d'un état de déformation acceptable ou l'absence d'interaction entre deux ouvrages mitoyens.

Au titre de la sûreté des installations nucléaires, des exigences de comportement plus contraignantes que les exigences prévues en application des Eurocodes sont généralement définies pour les structures de génie civil. Afin d'illustrer ces différences, une description générale des exigences prévues par les Eurocodes et des exigences généralement retenues par les exploitants est présentée ci-après³³.

3.1.1. Exigences traitées par les Eurocodes

Pour mémoire (cf. 1.4.1), les Eurocodes sont un ensemble de normes européennes régissant la conception et le calcul des ouvrages conventionnels de génie civil. Ils définissent des exigences de performances d'ouvrages, les lignes directrices concernant les aspects de fiabilité de ces ouvrages et des méthodes de vérification associées.

1) Exigences essentielles

L'avant-propos de chaque norme du référentiel Eurocodes précise le domaine d'application des Eurocodes dans lequel figurent deux exigences essentielles :

- la stabilité et la résistance mécanique,
- la sécurité en cas d'incendie.

2) Exigences de base et états-limites

La partie introductive du référentiel des Eurocodes, l'Eurocode 0, définit dans sa section 2 les exigences de base attribuées aux structures. Toute structure doit être conçue et dimensionnée afin que les exigences suivantes soient satisfaites :

- résistance structurale,
- aptitude au service,
- durabilité.

³³ L'ensemble des éléments transmis par les exploitants est présenté en Annexe 7.

Les exigences de base sont associées de manière quantitative à des **critères de dimensionnement**. Les états-limites de la structure (Etats limites de service et Etats limites ultimes) sont les états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux critères de dimensionnement pertinents.

La résistance structurale vise à assurer la sécurité des usagers et/ou de la structure. L'absence de dépassement d'états limites ultimes vise à respecter cette exigence. En effet, les états limites ultimes correspondent à un effondrement total ou partiel de l'ouvrage mettant en cause la sécurité des personnes qui peut être dû à :

- la perte d'équilibre de la structure ;
- la défaillance par rupture, déformation excessive ;
- la défaillance par fatigue.

L'aptitude au service concerne principalement le fonctionnement de la structure en utilisation normale, le confort des usagers et l'aspect de la construction. L'absence de dépassement d'états limites de service vise à respecter cette exigence en vérifiant des critères relatifs aux ;

- déformations ou aux déplacements (fonctionnalité, aspect, confort) ;
- vibrations (fonctionnalité, confort) ;
- dommages (fonctionnalité, aspect, durabilité).

La durabilité vise à assurer le maintien des performances requises dans le temps. Pour les situations accidentelles (séisme, explosion, neige accidentelle, incendie, choc...), seule l'absence de dépassement d'états-limites ultimes est à vérifier pour respecter des exigences de résistance structurale.

3) Exigences particulières propres à certaines situations

a) Situation d'incendie

Les exigences de sécurité en situation d'incendie sont définies dans l'avant-propos des normes relatives au calcul du comportement au feu (NF EN 1992-1-2, NF EN 1993-1-2, etc.). Un ouvrage doit être conçu et construit afin que les exigences suivantes soient satisfaites :

- la stabilité des éléments porteurs reste assurée pendant une durée déterminée,
- l'apparition et la propagation du feu et de la fumée à l'intérieur de l'ouvrage sont limitées,
- l'extension du feu à des ouvrages voisins est limitée,
- les occupants peuvent quitter l'ouvrage indemnes ou être secourus d'une autre manière,
- la sécurité des équipes de secours est prise en considération.

b) Situation sismique

Les exigences requises en situation sismique pour les bâtiments et ouvrages de génie civil sont définies dans le domaine d'application de la partie 1-1 de l'Eurocode 8. Les structures doivent être conçues et dimensionnées de telle sorte que les exigences suivantes soient satisfaites :

- les vies humaines sont protégées (exigence de non-effondrement),
- les dommages sont limités,
- les structures importantes pour la protection civile restent opérationnelles après un séisme.

Il convient de noter que les installations nucléaires ne sont pas couvertes par l'Eurocode 8. Pour les installations de surface, visées par le guide ASN 2/01 [57], le niveau sismique de référence est défini selon la RFS 2001-01 [58].

4) Conclusion

Les exigences de comportement des ouvrages prévues dans les Eurocodes ne permettent pas de satisfaire toutes les exigences attribuées aux ouvrages des installations nucléaires (supportage, participation au confinement...). Aussi, les exploitants nucléaires ont défini des exigences spécifiques qui sont présentées ci-après.

3.1.2. Exigences définies dans le référentiel CEA

Les exigences de comportement attribuées par le CEA aux ouvrages de génie civil des INB sont les suivantes :

- 1) Résistance
 - a) Exigence de stabilité d'ensemble (SE)
 - b) Exigence de non-interaction (NI)
 - c) Exigence de stabilité locale (SL)
 - d) Exigence de supportage (SP)
- 2) Comportement local de parois soumises à des impacts
 - a) Exigence de non-perforation
 - b) Exigence de non-écaillage
- 3) Etanchéité
 - a) Exigence de participation au confinement standard « clos et couvert »
 - b) Exigence de participation au confinement améliorée
 - c) Exigence de participation au confinement optimisée (PCO et PCOR)
- 4) Autres exigences spécifiques à des situations autres que le vent ou la neige
 - a) Exigence d'occupation immédiate
 - b) Exigences relatives à la maîtrise des risques liés à l'incendie :
 - Performance des matériaux vis-à-vis des effets du feu
 - Exigence (ou fonction) séparative vis-à-vis de la résistance au feu qui se traduit principalement par les exigences (ou fonctions) suivantes :
 - Etanchéité aux flammes et aux gaz chauds ;
 - Isolation thermique.
 - c) Exigence de non-débordement d'une piscine
 - d) Exigence de limitation des dimensions géométriques pour contrôler le risque de criticité

La définition de ces exigences est présentée en annexe 7.1.

3.1.3. Exigences définies dans le référentiel ORANO

Les exigences de comportement attribuées par ORANO aux ouvrages de génie civil des INB sont les suivantes :

- 1) Résistance, agressions et dommages
 - a) Exigence de stabilité d'ensemble (SE)
 - b) Exigence de stabilité structurelle (SS)
 - c) Exigence de supportage (SU)
 - d) Exigence de non-agression (NA)
 - e) Exigence de limitation des dommages (LD)
- 2) Etanchéité
 - a) Exigence de « clos et couvert » (CC)

- b) Exigence de rétention (RE) vis-à-vis des transferts liquides
 - c) Exigences de confinement (PC1, PC2, PC3) vis-à-vis des transferts de gaz ou de poudres en suspension
- 3) Durabilité (D)
- 4) Autres exigences spécifiques à des situations autres que le vent ou la neige - Exigences liées aux rayonnements ionisants
- a) Exigence de radioprotection (IR)
 - b) Exigence de conservation de la géométrie (CG)

La définition de ces exigences est présentée en annexe 7.2.

3.1.4. Exigences définies dans le référentiel EDF

Ces exigences de comportement des ouvrages de Génie Civil sont extraites du RCC-CW [59] et sont applicables à la conception.

Le RCC-CW constitue le code servant de base à la conception des ouvrages de Génie Civil classés de sûreté. Ce code permet de décliner les exigences de sûreté définies par le projet en critères de dimensionnement, pour les différents ouvrages et pour les différentes situations à considérer.

Le RCC-CW précise pour deux domaines de dimensionnement (domaine de conception de référence (DBD : Domaine du Design Basis) et domaine de conception étendu (DED : Domaine du Design Extension)) :

- la définition des actions à considérer ;
- les combinaisons d'actions à considérer ;
- les méthodologies de calcul ;
- les critères de vérification.

Le code propose des critères de vérification qui permettent de garantir le respect des exigences de sûreté des structures de génie civil en fonction des situations envisagées pour les deux domaines de conception (de référence et étendu) et en incluant la phase de construction. Les critères proposés par le code peuvent être adaptés en fonction du projet considéré.

Exigences fonctionnelles

Les trois fonctions fondamentales de sûreté pour une centrale nucléaire, qui doivent être impérativement remplies à tous les stades de la centrale, sont les suivantes :

- contrôle de la réactivité ;
- dissipation de la chaleur du réacteur et du stockage de combustible ;
- confinement des matériaux radioactifs, protection contre le rayonnement et maîtrise des rejets radioactifs planifiés, ainsi que limitation des rejets radioactifs accidentels.

Le contenu technique du RCC-CW définit les exigences en matière de comportement structurel afin de garantir ces trois fonctions de sûreté fondamentales au cours des phases de conception mais aussi tout au long de la vie des structures de génie civil. Les exigences dépendent de la contribution des éléments à la sûreté de la centrale, de leur nature, de leur rôle fonctionnel et de la disposition générale de la centrale.

L'ANNEXE D (informatif) du RCC-CW donne un exemple des exigences pour chacune des structures de l'Îlot Nucléaire, selon la liste ci-après.

- 1) Résistance
- a) Exigence de stabilité (S)
 - b) Exigence de supportage (R).

- 2) Etanchéité
 - a) Exigence d'étanchéité aux liquides (L)
 - b) Exigence de confinement des gaz (C)
- 3) Durabilité (D)
- 4) Service (F) : limitation des déformations compatibles avec le fonctionnement des équipements

La définition de ces exigences est présentée en annexe 7.3.

3.1.5. Exigences définies dans le référentiel FRAMATOME

Les exigences de comportement attribuées par Framatome aux ouvrages de génie civil des INB sont les suivantes :

- 1) Résistance
 - a) Exigence de stabilité d'ensemble (SE)
 - b) Exigence de non-interaction (NI)
 - c) Exigence de stabilité locale (SL)
- 2) Etanchéité
 - a) Exigence d'étanchéité aux liquides (E)

La définition de ces exigences est présentée en annexe 7.4.

3.1.6. Exigences définies dans le référentiel ANDRA

La démarche retenue par l'ANDRA est proche de celle du CEA et se décline pour les différents centres de stockage et pour les aléas climatiques de la manière suivante :

Centre de Stockage de la Manche : la configuration actuelle du CSM fait qu'une situation de vent ou de neige n'est pas de nature à entraîner une perte des fonctions à assurer. Ainsi, aucun SSC³⁴ n'est identifié comme EIP³⁵ pour la maîtrise de ces situations.

Centre de Stockage de l'Aube : proportionnellement aux enjeux, aucun SSC n'est valorisé dans la démonstration de sûreté pour la maîtrise des événements vent et neige. Les éventuelles conséquences évaluées sur la base de scénarios pénalisants conduisent à des conséquences négligeables pour les intérêts protégés.

Projet de stockage Cigéo : exigences identiques à celles du CEA.

3.1.7. Conclusion

Les exigences de comportement des ouvrages de génie civil retenues dans le dimensionnement et contribuant à la démonstration de sûreté des installations nucléaires ne sont pas couvertes par les Eurocodes. L'application des Eurocodes n'est pas suffisante pour répondre aux objectifs visés par la démonstration de sûreté. Aussi, les exploitants nucléaires ont défini des exigences spécifiques et des critères associés.

Le GT constate que les exploitants n'ont pas tous la même terminologie pour définir des exigences répondant à des objectifs de sûreté équivalents.

Une harmonisation de la définition des différentes exigences de comportement attribuées aux structures de génie civil des installations nucléaires et les critères de justification associés pour les situations qui font intervenir la neige et/ou le vent pourrait être un axe de réflexion.

³⁴ Systèmes, structures et composants.

³⁵ Equipements importants pour la protection

3.2. Principes des Eurocodes

3.2.1. Principes généraux des Eurocodes

Cette partie, rédigée par le CTICM repose notamment sur les Eurocodes [6], l'ouvrage de M. Calgaro [35] ainsi que l'article [36] rédigé par M. Ducloux en support aux travaux du GT et publié dans la revue Construction Métalliques en 2020.

Tous les codes de calcul des constructions fournissent des règles qui présentent un niveau de sécurité plus ou moins maîtrisé. Les codes les plus récents sont généralement fondés sur un format semi-probabiliste. Ce format est généralement considéré comme le meilleur compromis entre une approche totalement empirique et une approche purement probabiliste. L'approche empirique consiste à appliquer des coefficients de sécurité selon le jugement de l'ingénieur en tenant compte de l'expérience accumulée au fil des années. A contrario, une approche purement probabiliste consiste à effectuer les calculs pour une probabilité de ruine acceptée, en modélisant toutes les données du projet comme des variables aléatoires (actions, dimensions, propriétés des matériaux, etc.). Dans ce cas, il faut avoir une bonne connaissance des distributions statistiques de ces variables aléatoires. Cette approche relativement complexe n'est certainement pas à la portée de tous les bureaux d'études.

Les Eurocodes se fondent sur un format semi-probabiliste qui consiste à appliquer des coefficients partiels sur les actions d'une part, et des coefficients partiels sur les résistances d'autre part. Ces coefficients partiels, donnés dans les différentes parties des Eurocodes, ont été calibrés en employant des méthodes probabilistes sur la base de données statistiques disponibles.

Dans une approche semi-probabiliste comme celle des Eurocodes, le point de départ consiste à satisfaire, pour un élément de structure, la condition suivante :

$$Prob(Z \leq 0) \leq P_f$$

Où :

Z est une variable aléatoire qui représente la marge

$$Z = R - E$$

R est une variable aléatoire qui représente la résistance d'un élément de structure associée à l'effet considéré ;

E est une variable aléatoire qui représente l'effet des actions ;

$Prob()$ est une fonction de densité de probabilité ;

P_f est une probabilité acceptée de défaillance de l'élément.

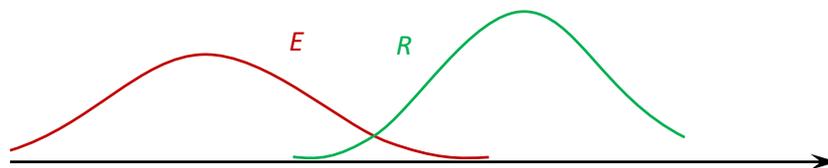


Figure 16 : Densités de probabilité de l'effet des actions (E) et de la résistance (R)

La figure ci-avant représente la densité de probabilité de l'effet des actions (E) et celle de la résistance (R). Un cas simple est celui d'une barre sollicitée en traction. Dans ce cas, la variable E est l'effort axial de traction qui peut avoir des origines de différentes natures (poids propre, actions climatiques, charge d'exploitation, etc.). La variable R est la résistance à la traction qui dépend de l'aire de la section et des propriétés du matériau (résistance ultime en traction). On comprend facilement le caractère aléatoire des actions climatiques mais la résistance en

traction d'une section présente également des incertitudes sur les dimensions de la section et sur la valeur de la résistance en traction du matériau.

Lorsque la sollicitation (effet des actions) est juste égale à la résistance, la marge Z est nulle et l'élément étudié est précisément à la limite entre ruine et non ruine :

$$Z = R - E = 0$$

Afin de respecter la probabilité P_f acceptée de défaillance d'un élément, on peut chercher à évaluer un nombre β d'écart-types de la marge qu'il faut retrancher à sa moyenne. On peut alors écrire :

$$m_Z - \beta \sigma_Z = 0$$

Où m_Z et σ_Z sont respectivement la moyenne et l'écart-type de la marge Z .

A partir de cette équation, on peut en déduire l'expression suivante :

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z}$$

Le format des Eurocodes se fonde sur cet indice de fiabilité β (indice de Cornell). En admettant que les variables R et E sont deux variables aléatoires indépendantes qui suivent des lois normales, on peut écrire :

$$m_Z = m_R - m_E$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}$$

L'indice de fiabilité β peut alors s'écrire :

$$\beta = \frac{m_R - m_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

En introduisant les lois normales centrées réduites U_R et U_E , respectivement associées à R et E , nous avons :

$$R = m_R + \sigma_R U_R$$

$$E = m_E + \sigma_E U_E$$

A la limite entre ruine et non ruine, nous obtenons :

$$m_R + \sigma_R U_R - (m_E + \sigma_E U_E) = 0$$

Ou encore :

$$\left(\frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \right) U_R - \left(\frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \right) U_E + \left(\frac{m_R - m_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \right) = 0$$

On peut définir des coefficients de sensibilité comme étant :

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

$$\alpha_E = \frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

On constate que :

$$\alpha_R^2 + \alpha_E^2 = 1$$

L'expression devient alors :

$$\alpha_R U_R - \alpha_E U_E + \beta = 0$$

Il est possible de donner une interprétation graphique de l'indice de fiabilité β dans l'espace des variables normales centrées réduites U_R et U_E , comme représenté à la Figure 17. Sur cette figure, les cercles représentés en pointillés sont des courbes de même densité de probabilité. L'indice de fiabilité est la distance du point de fonctionnement P à l'origine du repère. Le point de fonctionnement représente le point de défaillance le plus probable, avec la probabilité acceptée P_f . Dans ce diagramme, les coordonnées du point de fonctionnement sont $(-\alpha_R \beta, +\alpha_E \beta)$.

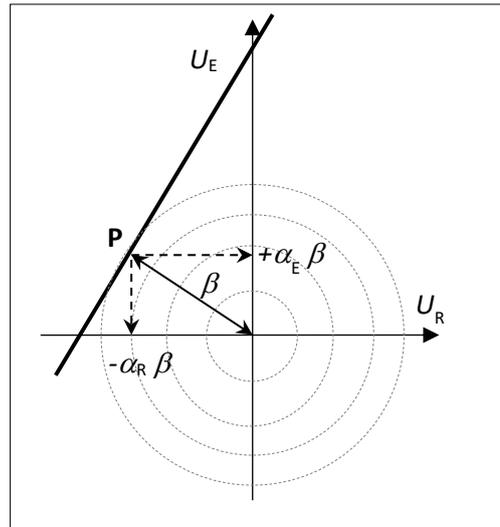


Figure 17 : Interprétation graphique de l'indice de fiabilité β

Dans l'espace des variables R et E , le point de fonctionnement P a pour coordonnées R_d et E_d :

$$R_d = m_R - \alpha_R \beta \sigma_R$$

$$E_d = m_E + \alpha_E \beta \sigma_E$$

R_d et E_d sont les valeurs de calcul, respectivement de la résistance et de la sollicitation (effet des actions). Ces valeurs peuvent être utilisées en pratique par le projeteur, sous réserve de pouvoir les calculer de manière simple. Elles dépendent des paramètres (moyenne et écart-type) des lois de distribution qui peuvent être estimés au préalable par l'exploitation de données statistiques. Cependant, par le biais du coefficient de sensibilité α_R , la résistance de calcul dépend de l'écart-type de la sollicitation E . De même, la valeur de calcul de la sollicitation dépend de l'écart-type de la résistance R .

Ces coefficients de sensibilité peuvent être déterminés par une analyse fiabiliste. Dans la version actuelle de l'Eurocode, les valeurs suivantes ont été fixées arbitrairement :

$$\alpha_R = 0,8 \quad \text{et} \quad \alpha_E = 0,7$$

Pour une durée de référence de 50 ans, l'indice de fiabilité a été fixé :

$$\beta = 3,8 \quad ^{36}$$

Toujours en supposant une loi de distribution normale, cette valeur de l'indice de fiabilité correspond à une probabilité de défaillance sur 50 ans :

³⁶ Il faut noter que cette valeur est utilisée pour les classes de conséquences 2 (conséquence moyenne) adaptées pour des « Bâtiments résidentiels et de bureaux, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient moyennes (par exemple bâtiment de bureau) ». Pour la classe de conséquence 3 (conséquence élevées), la valeur minimale recommandée pour l'indice bêta est 4,3

$$\Phi(-\beta) = \Phi(-3,8) = 7,2 \times 10^{-5}$$

Où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

En pratique, le projeteur ne détermine pas les valeurs de calcul à partir des paramètres des lois de distribution car il ne sait calculer que des sollicitations et des résistances à partir de valeurs nominales de variables de base. En particulier, du côté de la résistance, les valeurs nominales peuvent être des valeurs moyennes ou des valeurs caractéristiques (valeurs ayant une probabilité faible d'être dépassée du côté de l'insécurité). C'est pourquoi il est pratique de faire apparaître des coefficients partiels pour déterminer les valeurs de calcul. Ainsi la valeur nominale R_n de la résistance est divisée par un coefficient partiel noté γ_M alors que la valeur nominale E_n de la sollicitation est multipliée par un coefficient partiel γ_F :

$$R_d = \frac{R_n}{\gamma_M}$$

$$E_d = \gamma_F E_n$$

Les coefficients partiels sont calibrés au préalable à partir d'études statistiques et introduits dans les normes.

Il est alors pratique pour le projeteur d'effectuer la vérification d'un élément de structure avec la condition suivante :

$$E_d \leq R_d$$

Le dimensionnement optimal de l'élément est atteint lorsque la sollicitation de calcul E_d est juste égale à la résistance de calcul R_d , ce qui correspond précisément à la probabilité de défaillance acceptée, P_f .

La démarche décrite précédemment est basée sur deux variables aléatoires, la sollicitation E et la résistance R , qui sont supposées suivre des lois de distribution gaussiennes. En pratique, la situation est généralement plus compliquée car la sollicitation et la résistance dépendent de variables aléatoires de base par le biais de modèles de calcul plus ou moins complexes et qui peuvent avoir des lois de distribution différentes. Des méthodes de calibration appropriées doivent alors être utilisées pour déterminer les coefficients partiels.

Il convient d'ajouter que la future version de la norme EN 1990 diffère légèrement de celle en vigueur actuellement. En particulier, le choix des coefficients de sensibilité arbitraires évoqués dans ce document ($\alpha_E = 0,7$ et $\alpha_R = 0,8$) est dorénavant considéré comme une méthode simplifiée. Des valeurs déterminées par des méthodes classiques, utilisées dans le domaine de l'analyse de la fiabilité, peuvent être utilisées. La méthode FORM (First Order Reliability Method) est l'une de celles-ci. Elle est décrite dans la référence [3] à l'aide d'une application concrète faisant intervenir trois distributions (Normale pour les poids, Gumbel pour le vent et Lognormale pour la résistance) dans le cadre du calcul de la fiabilité d'un pylône de lignes électriques aériennes. Ces méthodes sont encore peu utilisées ou alors sur des structures complexes où les Eurocodes ne sont plus adaptés. La très grande majorité des bureaux d'études utilise la méthode simplifiée conventionnelle.

3.2.2. Combinaison d'actions

De manière générale, une structure est soumise à plusieurs actions qui sont susceptibles de s'appliquer de manière simultanée : charges permanentes, actions climatiques, charges d'exploitation, etc. L'Eurocode 0 définit des règles pour combiner ces différentes actions en tenant compte de la probabilité que ces actions puissent se produire simultanément.

Dans l'Eurocode 0, on distingue principalement deux types d'états limites : les états limites de service (ELS) et les états limites ultimes (ELU). Ici, nous nous intéressons exclusivement aux combinaisons pour les calculs vis-à-vis des états limites ultimes. Les situations de projet suivantes sont alors envisagées :

- situations de projet durables et transitoires,
- situations de projet accidentelles,
- situations de projet sismiques.

3.2.2.1. Situation de projet durables et transitoires

En ce qui concerne les **situations de projet durables et transitoires**, pour le calcul des structures de bâtiments en France, il convient de se référer à l'expression (6.10) de la norme [6] :

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Dans cette expression :

- « + » signifie « doit être combiné à »,
- le signe de sommation $\sum \dots$ signifie « l'effet combiné de ».

Cette expression comprend 4 termes principaux :

- les actions permanentes (G),
- les actions de précontrainte (P),
- une action variable de base (Q_1),
- les actions variables d'accompagnement (Q_i).

Parmi les différentes actions variables auxquelles la structure peut être soumise, chacune d'elles doit être envisagée comme action variable de base pour constituer l'ensemble des combinaisons d'actions à étudier, les autres pouvant être considérées comme actions variables d'accompagnement dans la mesure où il est physiquement possible qu'elles surviennent simultanément. Il est à noter que, pour les bâtiments, l'annexe nationale de l'Eurocode 0 précise qu'« *il n'est pas nécessaire d'envisager plus d'une action variable d'accompagnement. La prise en compte de plus de deux actions variables est spécifiée, lorsqu'il y a lieu, pour le projet individuel* ». (Clause A1.2.1).

Chaque terme de cette expression est le produit d'un coefficient partiel (qui pourrait être noté de manière générique γ_k) par la valeur caractéristique de l'action (indice k), à l'exception de l'action de précontrainte pour laquelle il s'agit de la valeur représentative. Les actions variables d'accompagnement sont affectées d'un coefficient ψ_0 qui est censé tenir compte de la probabilité réduite d'occurrence simultanée avec les autres actions variables. Les valeurs du coefficient ψ_0 sont données pour chaque type d'action en fonction du type d'ouvrage. Ainsi, pour les bâtiments, elles sont données dans l'Annexe A1 de l'Eurocode 0 [6] et dans son annexe nationale [37]. Pour les ponts, on se référera à l'Annexe A2 qui a fait l'objet de l'amendement A1 [38] à l'Eurocode 0 et à son annexe nationale [39].

3.2.2.2. Situations de projet accidentelles ou sismique

Lorsqu'il y a lieu d'envisager une action accidentelle, il convient d'appliquer la combinaison (6.11b) pour les situations de projet accidentelles, définie par l'Eurocode 0 [6], pour des vérifications vis-à-vis des états limites ultimes :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Dans cette expression, A_d est la valeur de calcul de l'action accidentelle. On notera qu'aucun coefficient partiel ne s'applique aux valeurs caractéristiques des actions. Les coefficients $\psi_{1,i}$ et $\psi_{2,i}$ tiennent compte de la probabilité réduite que ces actions atteignent leur valeur caractéristique simultanément avec la valeur de calcul de l'action accidentelle.

Pour les situations de projet sismiques, la combinaison (6.12b) de la norme s'applique :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Où A_{Ed} est la valeur de calcul de l'action sismique.

Comme pour les coefficients ψ_0 , les valeurs des coefficients ψ_1 et ψ_2 sont données, pour les bâtiments, dans l'Annexe A1 l'Eurocode 0 [6] et dans son annexe nationale [39], en fonction de la nature de l'action.

3.2.2.3. Combinaisons d'actions définies pour le vent et la neige dans les Eurocodes

En pratique, un nombre important de cas de calculs sont à prendre en compte, ce qui ne permet pas de décliner ici de façon exhaustive les combinaisons d'actions qui mobilisent les actions vent et neige.

A titre illustratif, cette partie explicite quelques-unes des combinaisons définies par les Eurocodes pour vérifier l'absence de dépassement d'état-limites ultimes vis-à-vis d'actions principales correspondant, soit au vent, soit à la neige, en focalisant plus particulièrement sur les valeurs associées aux autres actions climatiques prises en compte de façon concomitante.

Les coefficients ψ_0 et ψ_2 fixés par l'Eurocode 0 et son annexe nationale pour les actions climatiques sont rappelés dans le tableau suivant :

Tableau 4. Valeurs des actions variables définies dans l'Eurocode

Actions variables j	Valeur de Q_{kj} (chargement cinquantennale)	Valeur de $\gamma_{\alpha,i}$	Valeurs de ψ_{0i}	Valeurs de ψ_{2i}
Pour la neige S (Altitude < 1000 m)	Q_{kS} défini dans AN Eurocode 1-3	1,5	0,5	0
Vent W	Q_{kW} défini dans AN Eurocode 1-4	1,5	0,6	0
Variations thermiques T (hors incendie)	Q_{kT} défini dans AN Eurocode 1-5	1,5	0,6	0

Les combinaisons définies par les Eurocodes pour le calcul des Etat-limites Ultimes sont rappelées ci-après en simplifiant volontairement la formulation des actions permanentes notées ici G et de précontrainte, notées P. Le lecteur peut également se référer au glossaire des notions et notations des Eurocodes en partie 7.

Au titre des situations de projet durables et transitoires, on peut trouver par exemple :

$$1,35 G + P + 1,5 Q_{kW} + 0,75 Q_{kS} + 0,9 Q_{kT}$$

et $1,35 G + P + 1,5 Q_{kS} + 0,9 Q_{kW} + 0,9 Q_{kT}$

En pratique, sauf pour la neige, sur certaines zones de France (cf. § 5.2.1), les Eurocodes ne définissent pas de valeur d'action accidentelle A_d – il convient que la valeur de calcul A_d soit spécifiée pour les projets individuels³⁷ – mais il propose un cadre d'étude de ces actions au sein de combinaisons dans le paragraphe 6.4.3.3 de la norme NF EN 1990 (Eurocode 0).

$$G + P + A_{dW} + \sum \psi_{2j} Q_{kj} \quad \text{avec } \psi_{2j} = 0$$

$$G + P + A_{dS} + \sum \psi_{2j} Q_{kj} \quad \text{avec } \psi_{2j} = 0$$

Les différentes actions considérées dans ces combinaisons sont :

- G : action permanente,
- P : action de la précontrainte,
- Q_{kW} : action cinquantennale associée au vent,
- Q_{kS} : action cinquantennale associée à la neige
- A_{dW} : action accidentelle associé au vent
- A_{dS} : action accidentelle associée à la neige
- Q_{kj} : action variable,

³⁷ Voir § 4.1.2 de l'Eurocode 0

– ψ_{2j} : coefficient permettant de définir la valeur quasi-permanente de l'action Q_{kj} .

Sur ces aspects, le lecteur pourra se référer à la référence [14] (partie 6).

3.3. Combinaisons d'actions accidentelles pour le vent et la neige

3.3.1. Pratiques actuelles des exploitants nucléaires

Cette partie présente les « conditions d'analyse » actuellement retenues par les exploitants pour ce qui concerne les phénomènes naturels associés aux niveaux d'actions accidentelles qu'ils retiennent pour les nouvelles installations, pour le vent d'une part et la neige d'autre part.

Le terme de combinaison d'actions fait référence aux combinaison définies dans l'Eurocode 0 et présentée dans la partie précédente. Le terme de conditions d'analyse fait référence au vocabulaire employé par le GT « Agression externes » pour désigner les grandeurs secondaires pouvant influencer sur le comportement des SSC soumis aux effets de la SRN considérée. Il s'agit d'une part, des conditions d'origine naturelle (ex. les actions climatiques autres que celles considérées dans la SRN comme la température extérieure, le niveau de nappe phréatique...), d'autre part, des conditions liées à l'installation (ex. le poids propre des structures et équipements, la température et la pression d'exploitation dans les locaux...) (cf. Figure 48 en Annexe 1).

L'ensemble des éléments présentés par les exploitants est tracé en Annexe 8. La suite de cette partie propose une synthèse de ces éléments focalisant plus précisément sur les actions climatiques, en homogénéisant les notations afin de faciliter la comparaison des pratiques.

Les notations utilisées dans cette partie reprennent celles des Eurocodes présentées précédemment : le signe « + » indique « doit être combiné à » et le signe de sommation \sum ... signifie « l'effet combiné de ».

Dans de nombreux cas, des calculs multiples sont réalisés pour tenir compte de toutes les configurations possibles concernant l'aléa et les structures. Par exemple, le calcul des effets de la neige combinée à du vent va tenir compte de 4 directions de vent possible, de différentes positions possibles de pont roulant, etc. Ce niveau d'information n'est pas détaillé ici. Il peut conduire à indiquer des gammes de valeurs pour certains coefficients, étant entendu que, sans autre éléments d'explication mentionnée, dans le détail des calculs, c'est en pratique la valeur conduisant à l'effet le plus pénalisant qui est retenue.

A noter que les pratiques actuelles concernent la conception des projets récents. Le dimensionnement des installations plus anciennes repose sur les règles Neige et Vent qui traitent différemment ces combinaisons d'action / conditions d'analyse.

EDF indique se référer au RCC-CW [59] qui précise :

- la définition des actions à considérer (sans prescrire la valeur de l'aléa qui est une donnée projet),
- les combinaisons d'actions à considérer.

Sauf spécification dans le Rapport de Sûreté ou un document équivalent, la caractérisation des actions climatiques est conforme à la méthodologie donnée par les Eurocodes.

Les combinaisons d'actions, présentées dans le paragraphe DGENR 3400 du RCC-CW, sont définies selon les principes généraux des Eurocodes. Ces combinaisons d'actions peuvent être adaptées par le projet afin de les mettre en cohérence avec le référentiel de sûreté.

Tableau 5. Combinaisons d'actions retenues par EDF pour les situations accidentelles vent et neige (domaine de conception de référence : Design Basis)

Conditions de fonctionnement du Design Basis			ACTIONS PERMANENTES			ACTIONS VARIABLES (Situations de référence durables)										ACTIONS VARIABLES (Situations de référence transitoires)			ACTIONS ACCIDENTELLES	
N°	Nom	Etat limite	G _{k,sup} (a)	G _{k,inf} (a)	P (a)	Q _{k,C} (b)	Q _{k,L} (c) (3)	Q _{k,T} (d)	Q _{k,T,H} (e)	Q _{k,w} (f)	Q _{k,s} (f)	Q _{k,wLEF} (g)	Q _{k,wLEF} (g)	Q _{k,wLEH} (g)	Q _{k,Test} (h)	Q _{k,T,E} (i)	Q _{k,E} (j)	Int (k)	Ext (k)	
15	Vent accidentel	ELU.a	1,0	1,0	1,0	-	0,3 (1)	0,5	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-	A _{db,w}	
16	Neige accidentelle	ELU.a	1,0	1,0	1,0	-	0,3 (1)	0,5	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-	A _{db,s}	
20 (2)	DBE + conditions climatiques	ELU.a	1,0	1,0	1,0	-	0,3 (1)	0,5	-	0,2	0,2	-	1,0	-	-	-	-	-	A _{db,E}	

C'est à dire :

$$G + P + A_{d,w} + 0,3 Q_{k,L} + 0,5 Q_{k,T}$$

$$G + P + A_{d,s} + 0,3 Q_{k,L} + 0,5 Q_{k,T}$$

Avec en particulier $Q_{k,L}$: charges d'exploitation et $Q_{k,T}$ actions dues aux variations de température causées par les conditions climatiques d'exploitations.

Le CEA se reporte à l'approche Eurocodes en retenant les valeurs des coefficients ψ_2 définies dans le tableau suivant :

Tableau 6. Valeurs des actions d'accompagnement retenues par le CEA pour les situations accidentelles vent et neige

Actions variables	Valeurs de ψ_2	Commentaires
Charges d'exploitation	$0 \leq \psi_2 \leq 1$	La valeur maximale de ψ_2 dépend de la nature des charges. Elle peut varier au sein d'un même ouvrage.
Neige	$0 \leq \psi_2 \leq 0,2$	Pour ces actions, les valeurs des coefficients ψ_2 définies dans la norme NF EN 1990 sont nulles. Les valeurs maximales retenues par le CEA sont celles des coefficients ψ_1 définissant les valeurs fréquentes des actions.
Vent	$0 \leq \psi_2 \leq 0,2$	
Variations thermiques	$0 \leq \psi_2 \leq 0,5$	

Dans les combinaisons d'actions, le coefficient ψ_2 d'une action est pris égal à zéro lorsque ses effets sont favorables et à une valeur comprise entre zéro et la valeur maximale indiquée dans le tableau ci-dessus lorsque ses effets sont défavorables. Dans ce dernier cas, la valeur zéro peut être retenue si l'action climatique quasi-permanente, calculée par une étude statistique ou avec la valeur maximale du coefficient ψ_2 indiquée dans le tableau ci-dessus, est jugée négligeable devant les autres actions considérées.

Pour la neige et le vent, une étude statistique a été réalisée pour certains sites du CEA afin de déterminer leurs valeurs quasi-permanentes et les coefficients ψ_2 sont compris entre zéro et 0,2 (le coefficient ψ_2 étant pour mémoire le rapport entre les charges quasi-permanente et caractéristique). Lorsqu'aucune étude statistique n'a pas été effectuée, le coefficient ψ_2 est pris égal à 0,2 si l'action quasi-permanente n'est pas jugée négligeable et à 0 dans le cas contraire.

Pour les charges d'exploitation, le coefficient ψ_2 est par exemple pris égal à zéro pour les charges d'entretien des toitures inaccessibles.

Pour la neige, le coefficient ψ_2 est pris égal à zéro lorsque les variations thermiques considérées sont celles de la saison chaude.

Les variations thermiques peuvent être négligées lors de l'étude de certaines structures et le coefficient ψ_2 est alors pris égal à zéro. Les variations de température quasi-permanentes sont généralement connues sur les centres du CEA et le coefficient ψ_2 y est inférieur à 0,5.

La formulation explicite des combinaisons peut s'écrire ainsi :

$$G + P + A_{d w} + [0 \text{ à } 1] Q_{k L} + [0 \text{ à } 0,5] Q_{k T} + [0 \text{ à } 0,2] Q_{k S}$$

$$G + P + A_{d s} + [0 \text{ à } 1] Q_{k L} + [0 \text{ à } 0,5] Q_{k T} + [0 \text{ à } 0,2] Q_{k W}$$

Avec en particulier $Q_{k L}$: charges d'exploitation et $Q_{k T}$ actions dues aux variations de température causées par les conditions climatiques d'exploitations.

ORANO définit des combinaisons d'actions accidentelles en cohérence avec le référentiel technique constitué par les références citées dans le standard interne ORANO concernant les règles de conception, de dimensionnement et de vérification du génie civil (Eurocodes notamment) [40].

Les valeurs des actions d'accompagnement climatiques (neige, vent et température) sont prises égales aux valeurs quasi-permanentes. Deux cas sont distingués :

- En l'absence d'étude statistique spécifique des données de site : la valeur quasi-permanente est définie en appliquant le coefficient ψ à la valeur caractéristique.
- Lorsqu'une étude statistique des données de site est utilisée : les valeurs $Q_{qp,x}$ définies dans un document ORANO propre au site (guide aléas) sont appliquées ; par exemple pour le vent, la valeur de vitesse de pointe médiane est retenue.

Par analogie avec l'approche retenue pour l'action variable de calcul $Q_{d,x}$, l'action accidentelle de calcul $A_{db,x}$ est quant à elle prise égale à l'action accidentelle caractéristique ($A_{k,x}$: période de retour centennale déterminée par la théorie des valeurs extrêmes), pondérée par le produit des facteurs $\gamma_q \times \gamma_{Ed} = 1 \times 1,05$ pour les réexamens périodiques. Une pénalisation forfaitaire supplémentaire est appliquée pour les ouvrages neufs.

Les actions accidentelles ne sont pas combinées entre elles.

Les coefficients sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7. Combinaison d'actions retenues par le ORANO pour les situations accidentelles vent et neige

Actions	Permanent		Variables				Accidentelles
	$G_{k,max}$	$G_{k,min}$	$Q_{k,L}$	$Q_{k,T}$	$Q_{k,S}$	$Q_{k,W}$	A
Vent	1,0	1,0	0,5	0,2 γ_{th} (*) $\gamma_{th} Q_{qp,T}$ (**)	0,2 (*) $Q_{qp,S}$ (**)	-	$A_{db,W}$
Neige	1,0	1,0	0,5	0,2 γ_{th} (*) $\gamma_{th} Q_{qp,T}$ (**)	-	0,2 (*) $Q_{qp,W}$ (**)	$A_{db,S}$

Actions d'accompagnement en situation accidentelle – Coefficients ψ

Elles peuvent s'écrire sous la forme :

$$G + A_{d w} + 0,5 Q_{k L} + 0,2 \gamma_{th} Q_{k T} + 0,2 Q_{k S} \quad (*) \text{ ou } G + A_{d w} + 0,5 Q_{k L} + \gamma_{th} Q_{qp T} + 0,2 Q_{qp S} \quad (**)$$

$$G + A_{d s} + 0,5 Q_{k L} + 0,2 \gamma_{th} Q_{k T} + 0,2 Q_{k W} \quad (*) \text{ ou } G + A_{d s} + 0,5 Q_{k L} + \gamma_{th} Q_{qp T} + 0,2 Q_{qp W} \quad (**)$$

(*) : pas d'application d'une étude statistique propre au site

(**) : dans le cas d'une étude statistique propre au site

Framatome indique définir l'aléa de vent en situation normale d'exploitation conformément aux Eurocodes 1-4. L'aléa de vent pour les situations accidentelles de dimensionnement est défini de manière à retrouver le même chargement de pression dynamique extrême défini dans les règles NV65 – Février 2009 [60]. Les chargements de neige en situation normale et accidentelle de dimensionnement sont définis conformément aux Eurocodes 1-3. Les combinaisons liées aux actions climatiques sont conformes aux Eurocodes.

L'ANDRA indique retenir des valeurs caractéristiques d'aléas ainsi que des combinaisons liées aux actions climatiques conformes aux Eurocodes 1-3 pour la neige et 1-4 pour le vent.

3.3.2. Conclusions et préconisations

La plupart des exploitants définissent une valeur de vent et de neige accidentelle (respectivement notées A_{dw} et A_{ds}) dont ils tiennent compte dans une combinaison d'actions accidentelles conforme à l'Eurocode. Cependant, les actions d'accompagnements considérées peuvent varier d'un exploitant à l'autre, voire d'un site à l'autre pour un même exploitant.

Plusieurs exploitants prennent en compte des actions d'accompagnement de vent et de neige correspondant à l'action du vent cinquantennal pondérée d'un coefficient $\psi_2 = 0,2$ ou une valeur d'accompagnement $Q_{qp w}$, $Q_{qp s}$ ou $Q_{qp T}$ issue d'une étude statistique propre au site. Dans le cas du vent pour certains sites ORANO, la valeur de la vitesse de pointe médiane a pu être retenue.

À l'issue de ce travail d'inter-comparaison des pratiques, le GT considère que les effets sur les structures des niveaux d'aléas WENRA devraient être étudiés comme des actions accidentelles au sens des Eurocodes.

Le GT constate que les pratiques des exploitants concernant les valeurs des actions climatiques d'accompagnement des actions accidentelles ne sont pas homogènes. Un axe de réflexion peut être leur harmonisation.

Dans l'attente des résultats de ce travail, l'IRSN propose de retenir une vitesse de vent d'accompagnement (valeur à définir, non nulle) pouvant être associée au niveau de neige WENRA pris comme neige accidentelle de référence.

Compte tenu du faible nombre de jours annuels de neige en plaine, il n'a pas été retenu de neige d'accompagnement vis-à-vis du niveau de vent WENRA pris comme vent accidentel de référence.

Les autres actions d'accompagnement et leur combinaison avec les niveaux d'aléas WENRA sont à définir dans le cadre de la démonstration de sûreté de chaque installation.

4. VENT : CARACTERISATION DE L'ALEA ET EFFETS

Cette partie présente successivement l'état des pratiques et des connaissances associées à l'évaluation des niveaux de vent extrêmes par les approches statistiques (§ 4.1), les propositions et positionnements des membres du GT vis-à-vis d'une majoration permettant d'atteindre la cible WENRA (§ 4.2), la démarche Eurocode 1-4 pour l'étude des effets du vent sur les structures (§ 4.3) et les approches alternatives fondées sur des mesures sur sites, de la simulation numérique ou physique à échelle réduite (§ 4.4). Un schéma récapitulatif des étapes de l'Eurocode et des approches alternatives est présenté en paragraphe 4.5. Les effets indirects (projectiles), effets sur les ventilations et autres effets liés aux vents forts sont présentés aux paragraphes 4.6 à 4.8. Enfin le paragraphe 4.9 évoque le cas spécifique des vents de rafales convectives.

Dans cette partie l'usage du terme Eurocode renvoie à l'Eurocode 1-4 qui concerne le vent.

4.1. Traitement statistique des vents extrêmes

Cette partie a été rédigée par EDF, relue et commentée par l'IRSN, le CSTB et Météo-France.

4.1.1. Objectif

Les méthodes statistiques permettent, d'un point de vue mathématique et sous réserve que les données d'entrée remplissent un certain nombre de conditions, d'associer une période de retour à l'intensité d'une caractéristique d'un phénomène.

C'est pour cette raison que ces méthodes sont utilisées à chaque fois qu'elles sont possibles et légitimes pour caractériser les intensités de référence des phénomènes.

La notion de période de retour est couramment utilisée pour les études de conception en lien avec la réglementation. La période de retour donne une indication de la fréquence d'occurrence en années : un niveau de retour T années est un niveau atteint ou dépassé en moyenne 1 fois toutes les T années. On définit donc p comme la probabilité qu'une valeur donnée de la variable soit dépassée sur une période d'un an. Cette valeur est, par la définition donnée précédemment, le niveau de retour. Il en découle la définition symétrique de la période de retour comme étant la période définie par $T=1/p$, exprimée en années, qui représente l'inverse de la probabilité de dépasser le niveau de retour sur une année.

Pour les périodes de retour élevées qui sont considérées par la réglementation et les études de sûreté associées, la méthode statistique utilisée fait appel à la théorie des valeurs extrêmes, décrite en Annexe 9. La suite de cette partie présente les bonnes pratiques recensées par le GT concernant l'application de statistiques des extrêmes aux séries d'observations de vitesses de vents.

4.1.2. Principales études recensées par le GT

Météo-France réévalue chaque année les périodes de retour sur les niveaux de vent instantané (FXI, mesurée sur 0,5 s) et de vent moyen sur 10 min (FXY) pour des périodes de retour allant jusqu' à 10 ou 50 ans selon la longueur de la série et mène un exercice de comparaison avec les résultats de l'année précédente³⁸.

La carte des valeurs de vent de période de retour cinquantennale issue de l'annexe nationale de l'Eurocode constitue également une référence. Elle partage la métropole en 4 zones pour lesquelles sont attribuées des vitesses moyennes de référence sur 10 min, de valeurs comprises entre 22 et 28 m/s (cf. § 4.3.1 4). Cette carte se fonde sur l'étude du CSTB [19] qui détaille des études statistiques menées sur des séries d'observations datant de 2005 et contenant entre 10 et 47 ans (4 stations seulement avec plus de 40 années d'observations), elle mériterait d'être remise à jour pour intégrer les observations disponibles depuis.

En plus de ces études qui font référence, d'autres études ont été partagées au sein du GT, menées en interne par certains exploitants, par le CSTB ou l'IRSN (étude [61] par exemple). Des approches menées à partir de données de réanalyse ont également pu être évoquées (à partir des réanalyse Vanessa et des modélisations Arome par exemple), sans disposer cependant d'une documentation complète associée³⁹.

4.1.3. Bonnes pratiques de traitement statistique des données de vent

Les études statistiques sur le vent peuvent être menées sur différents types de données (vent moyen sur 10 mn ou vent instantané). Certains jeux de données ont aussi subi des corrections. Par exemple, le CSTB corrige les effets locaux de site en ramenant les données aux conditions de références (à 10 m, rugosité II, etc.). Certaines études sont aussi réalisées à partir de données de vitesses au carré (homogène à des pressions).

A noter que le choix de travailler sur des vitesses ou des vitesses élevées au carré (pratique du CSTB), peut conduire à des valeurs de vitesses de vent extrapolées différentes. Il n'a cependant pas été mis en évidence de raison qui permettrait de favoriser la prise en compte de l'une de ces deux grandeurs.

³⁸ Les durées de retour, au statut données commerciales, sont à commander en mode off line sur l'espace service Météo-France.

³⁹ Voir par exemple <http://icem2019-abstract-submission.p.wemc.currinda.com/days/2019-06-25/abstract/800>.

Cette partie présente les bonnes pratiques mises en œuvre par EDF et complétées par les différents organismes qui mènent des études d'extrapolation statistiques. Elle s'appuie notamment sur des études appliquées partagées au sein du GT par le CSTB, Météo-France et l'IRSN.

Traitement des données

La première étape consiste à rechercher des données pouvant permettre une telle évaluation : un échantillon le plus long possible de mesures effectuées dans les mêmes conditions (taille et homogénéité de l'échantillon). Les techniques de mesure de la vitesse du vent ont évolué, et il peut être difficile de trouver des séries de mesure satisfaisant ces conditions.

Les échantillons de données observées de vent ont généralement une profondeur de 30 à 50 ans selon les stations⁴⁰. Cependant, au cours des séries, les capteurs ont souvent été changés, et il est nécessaire soit de corriger les biais induits par le changement, soit lorsque ce n'est pas possible, de se limiter aux données collectées avec un seul type de capteur afin d'assurer des données les plus homogènes possibles.

Une fois la série de données récupérée, il est nécessaire de s'assurer qu'elle ne présente pas trop de valeurs manquantes, notamment lors des tempêtes.

Par ailleurs, la vitesse du vent varie selon les saisons en France et il peut être nécessaire, pour assurer au mieux la stationnarité, de différencier les saisons⁴¹. Dans l'étude [61] qui traite des données de vent non corrigées des effets locaux, l'IRSN utilise des tests statistiques pour vérifier la stationnarité et l'homogénéité des mesures de vent. Les tests soulèvent un potentiel problème sur les données de vent moyen d'une soixantaine de station sur une centaine de stations étudiées. Des calculs complémentaires n'ont pas permis de dégager un effet de la différenciation des saisons dans ce cas.

L'indépendance doit être assurée entre les observations. Pour la méthode des maxima par blocs, l'indépendance est vérifiée si les observations sélectionnées pour deux blocs ne se suivent pas. Pour appliquer la méthode par dépassement de seuils, il est nécessaire de préparer les données. EDF R&D recourt à un critère d'au moins 1 jour en-dessous du seuil entre deux observations supérieures à un seuil. L'IRSN utilise un critère de 3 jours. Pour le CSTB, dans son étude de 2005, le critère correspond à une observation en dessous de la moitié de la valeur du seuil initial. Météo-France recourt à un critère correspondant à la valeur maximale sur une fenêtre glissante de 60 h.

Bruitage

Les mesures de vent sont souvent données en valeurs entières ou avec une seule décimale, ce qui conduit à des ex-aequo. Pour l'éviter, on peut ajouter à chaque valeur une partie décimale tirée aléatoirement dans l'intervalle $[-0,5 ; 0,5]$ selon une distribution uniforme. Ce traitement est appelé « jittérisation » ou également « bruitage ». EDF R&D arrondit toutes les valeurs à l'entier le plus proche, puis applique un bruitage sur toutes les valeurs. Le CSTB, tout comme Météo-France, n'applique le bruitage que sur les observations en valeurs entières. Dans l'étude vent [61], l'IRSN a directement bruité l'ensemble de la chronique.

Ensuite, afin de minimiser l'impact de ce traitement aléatoire, l'analyse peut être conduite un grand nombre de fois avec des tirages différents, ce qui conduira à une distribution des niveaux de retour et des bornes des intervalles de confiance à partir de laquelle on pourra construire l'estimation visée. EDF retient une moyenne ou médiane sur l'ensemble des échantillons, tandis que Météo-France, tout comme l'IRSN dans son étude, ajuste sur un échantillon jugé représentatif en calculant une distance pondérée (méthode appelée « Ventilation » dans les documents Météo-France).

⁴⁰ Météo-France réalise aussi des études statistiques sur des séries plus courtes, entre 12 et 38 ans. La contribution « Phénomène et données » précise les différentes sources de données disponibles.

⁴¹ Cette étape est notamment pertinente dans le cas de l'application de la méthode des dépassements de seuil, car alors la fréquence de dépassement du seuil dépendra de la saison, et ne pourra pas être considérée comme un processus de Poisson homogène et l'estimation de l'intensité du processus sera faussée. Dans le cas de l'approche par maxima par blocs, si le bloc est annuel, les conséquences peuvent passer inaperçues, mais on risque soit d'avoir deux maxima issus d'un même événement si une tempête arrive en fin d'année, soit de mélanger différents phénomènes si une année peu tempétueuse en hiver a connu un été orageux. Par ailleurs, si on définit plusieurs blocs par an, alors les maxima ne seront pas homogènes.

Ajustement statistique

Si l'ajustement est fait avec une méthode par dépassements de seuil, il est nécessaire de faire un compromis entre la certitude de n'inclure que des données extrêmes, et la nécessité d'inclure un nombre suffisant d'observations pour réaliser une extrapolation.

Diverses méthodes de choix de seuils existent. Dans son étude [61], l'IRSN utilise le seuil correspondant au quantile 1 %, tandis qu'EDF teste généralement plusieurs seuils et retient une valeur moyenne, ce qui permet de contrôler la sensibilité du modèle au choix du seuil. Météo-France utilise systématiquement la méthode par dépassement de seuil pour les stations dont la profondeur est inférieure à 25 ans, en utilisant une méthode de choix de seuil automatique basée sur la linéarité des excès. Le seuil obtenu conserve entre 2 et 4 observations annuelles.

Il n'y a pas de consensus sur le nombre de paramètres à retenir de façon générale pour la loi d'ajustement. Il est possible de tester la significativité du paramètre de forme et de le remplacer par 0 le cas échéant ou de conserver le paramètre de forme estimé pour chaque itération bruitée et pour un même seuil. Les études ([61] par exemple) montrent que les résultats sont similaires.

L'étendue de la période d'observations des données utilisables dépasse rarement une quarantaine d'années. Dans ces conditions, il n'est pas jugé raisonnable d'extrapoler les lois déterminées par la théorie des valeurs extrêmes au-delà d'un certain niveau de retour. Météo-France estime qu'il n'est valide de calculer que les quantiles inférieurs à 4 fois la profondeur de l'échantillon.

Côté EDF, il a été retenu de ne pas utiliser les valeurs estimées par la théorie des valeurs extrêmes (niveau de retour et intervalle de confiance) au-delà d'une période de retour de 200 ans. Il est également recommandé de comparer différentes approches et différents choix pour le compromis entre approximation probabiliste et statistique afin de vérifier la sensibilité des résultats à ces choix. Par ailleurs, comme mentionné plus haut, si une méthode de jittérisation a dû être mise en œuvre, la sensibilité du résultat à cette étape doit être testée également. Enfin, lorsque les estimations sont effectuées point par point en différents lieux d'un territoire, la cohérence météorologique des résultats obtenus doit être vérifiée.

Indépendamment de la série à ajuster (données historiques, régionales) et du choix de la distribution (distributions des valeurs extrêmes ou non), l'estimation des paramètres de la distribution est également une problématique large. Les méthodes disponibles incluent entre autres :

- la méthode de vraisemblance [61],
- la méthode de vraisemblance généralisée [64],
- la méthode des L-moments [63],
- la méthode des moments pondérés [65].

Ces méthodes ont toutes leurs avantages et inconvénients. Les méthodes bayésiennes ([66] et § 4.1.4.4) sont également populaires car elles permettent d'obtenir l'incertitude associée aux paramètres estimés dans un cadre rigoureux.

Intervalle de confiance

Le calcul d'intervalle de confiance et le fait de retenir la borne supérieure dépend de l'usage fait de l'étude.

La carte de l'Eurocode et l'étude CSTB de 2005 n'ont pas pris en compte d'intervalle de confiance. Météo-France calcule classiquement des intervalles de confiance à 70 %⁴². Les échanges au sein du GT n'ont pas permis de

⁴² A ce sujet, J. Biétry a fait observer lors de la phase de commentaires du rapport que la valeur de la majoration est variable d'un site à l'autre dans les études, pouvant atteindre la dizaine de pourcent selon [61]. Il relève qu'une préconisation du GT visant à retenir la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% d'une valeur cinquantennale pourrait décourager de mettre à jour les valeurs cinquantennales issues de l'annexe nationale de l'Eurocode (qui n'intègrent pas l'intervalle de confiance). Dans l'ensemble de la chaîne de calcul portant sur la mesure anémométrique de Météo-France, les corrections d'effets locaux à la station, les incertitudes d'échantillonnages, la prise en compte de la rugosité (pas simple, en pratique, et a priori « conservative » par principe) de l'orographie du site de construction, le choix des coefficients de pression (reposant dans l'EN sur des études de cas simples,

...

définir une méthode de calcul des intervalles de confiance préférable (la méthode Delta est plus pratique et déjà implémentée, mais reposant sur une hypothèse asymptotique ; la méthode par profil de vraisemblance est plus complexe et nécessite plus de vérifications). La suite de cette partie présente un tour d'horizon des perspectives de méthodes avancées permettant d'améliorer l'évaluation des niveaux des vent extrêmes par des approches statistiques

4.1.4. Autres approches statistiques identifiées par le GT

4.1.4.1. Stationnarisation des variables

L'application de la théorie statistique des valeurs extrêmes nécessite, comme indiqué précédemment, que la variable étudiée puisse être considérée comme stationnaire, c'est-à-dire que sa distribution est conservée par translation sur l'ensemble de la période. Les vitesses de vent peuvent différer selon les saisons, ce qui peut être traité en ne retenant que les données des saisons à risque. Les climatologues n'identifient aucune tendance significative dans les vitesses de vent liée au changement climatique. En revanche, le vent à nos latitudes est soumis à des variations aux échelles décennales ou multi décennales, qui peuvent conduire à des périodes plus ou moins ventées. Cette variabilité décennale est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles il est difficile d'identifier un signal attribuable au changement climatique d'origine anthropique.

Pour la température, on a pu montrer [28] que la suppression de tendances non paramétriques de moyenne et d'écart-type conduisait à une variable réduite dont les extrêmes peuvent être considérés comme stationnaires. Le paramètre de lissage optimal des tendances est recherché par une méthode de validation croisée partitionnée modifiée, et cette procédure permet de prendre en compte, dans le cas de la température, la combinaison entre la variabilité interannuelle et la tendance au réchauffement. Un test basé sur la simulation a été mis au point pour évaluer la stationnarité des extrêmes de la variable réduite. Cette même procédure pourrait donc être appliquée aux séries de vitesse de vent, afin de vérifier si elle permet, dans ce cas aussi, de disposer d'une variable dont les extrêmes peuvent être considérés comme stationnaires. Cette approche nécessitera ensuite de rechercher la meilleure façon de passer des extrêmes de la variable réduite à ceux de la vitesse du vent, selon l'importance relative des composantes supprimées.

Une autre façon d'aborder ce problème pourrait être de séparer les saisons selon un indicateur de la variabilité à ces échelles de temps, comme l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) par exemple. Les extrêmes peuvent alors être estimés pour chaque sous-échantillon, puis recombinaison pour obtenir le niveau souhaité. Cependant, cette approche présente l'inconvénient de conduire à des sous-échantillons plus courts, mais vraisemblablement plus homogènes. Dans un contexte où les séries complètes dont on dispose sont déjà généralement trop courtes pour les niveaux visés, on peut craindre une augmentation des incertitudes.

4.1.4.2. Analyse régionale

Compte tenu des longueurs limitées des observations dont on dispose pour les estimations visées, toute technique pouvant permettre d'enrichir les échantillons est bienvenue. L'analyse régionale permet de disposer d'échantillons plus longs pour appliquer la théorie statistique des valeurs extrêmes, en jouant sur la dimension spatiale pour suppléer la faiblesse de la dimension temporelle. Le principe de l'analyse régionale est décrit en détails dans le document de thèse de Jérôme Weiss [29], et on se contentera d'en rappeler succinctement le principe.

Pour chaque site d'une région, si X_i représente la série des valeurs observées, on a vu précédemment que la théorie statistique des valeurs extrêmes indique que la distribution des valeurs supérieures à un seuil élevé fixé u_i converge asymptotiquement vers une distribution généralisée de Pareto (GPD) : $X_i \sim GPD(u_i, \sigma_i, \xi_i)$ avec u_i le seuil, σ_i le paramètre d'échelle et ξ_i le paramètre de forme de la distribution de Pareto. L'analyse régionale est basée sur le fait que, dans une région homogène du point de vue du phénomène considéré (les vents forts ici),

en soufflerie dont on a tendance à garder les valeurs plutôt pessimistes, par précaution), les incertitudes étant statistiquement indépendantes, il faudrait pouvoir combiner les plus grosses de ces incertitudes dans des études de variance. Sans oublier qu'il y a encore sans doute des marges dans le calcul des résistances des matériaux.

la distribution des extrêmes de chaque série réduite Y_i avec $Y_i = X_i/u_i$ converge asymptotiquement vers une distribution généralisée de Pareto avec un seuil de 1, un paramètre d'échelle égal à σ_i/u_i et le même paramètre de forme ξ_i . Alors, moyennant une mesure de la dépendance régionale, en concaténant toutes les séries Y_i , on obtient une série de longueur effective généralement inférieure à la somme des longueurs des séries de départ (elle serait exactement égale à la somme si toutes les séries étaient indépendantes), dont la distribution des valeurs supérieures à 1 converge asymptotiquement vers une distribution de Pareto généralisée. Ainsi, en ajustant une distribution de Pareto généralisée à ces nouvelles données, on obtient une estimation des valeurs des paramètres d'échelle et de forme (γ et ξ), à partir desquels on peut déduire les valeurs de ces mêmes paramètres pour chaque série indépendamment ($\sigma_i = \gamma u_i$ et $\xi_i = \xi$).

L'avantage de la méthode est que l'ajustement sur les extrêmes de la série Y est plus robuste, puisqu'il est basé sur un nombre d'événements bien plus conséquent que celui de chaque série prise individuellement. Il est cependant nécessaire de vérifier l'homogénéité statistique de la région considérée et d'estimer la dépendance régionale pour en déduire la longueur effective de la série régionale ainsi formée.

La définition de régions homogènes se fait en deux temps : identification sur une base physique puis vérification de l'homogénéité statistique de la région. Pour la première étape, J. Weiss base la sélection de régions sur critère physique sur une méthode d'identification des empreintes de tempêtes. Une empreinte de tempête correspond à un ensemble de stations voisines où un seuil élevé de vitesse de vent est dépassé sur une même période. Elle est identifiée par une méthode de classification spatiotemporelle des valeurs au-dessus du seuil choisi. Les paramètres à fixer sont alors le voisinage temporel (Δ), le voisinage spatial (η) et le seuil (en général, un quantile élevé de la distribution). Hamdi et al. [30] proposent une autre approche qui consiste à calculer pour un site cible (le site sur lequel on souhaite faire l'estimation d'extrêmes) la dépendance de queue de la distribution avec celles de l'ensemble des autres séries, puis de regrouper celles pour lesquelles cette dépendance dépasse un seuil fixé. La dépendance de queue est caractérisée par l'extremogramme :

$$\rho(h) = \lim_{x \rightarrow \infty} P(Y_h > q_2 | X_0 > q_1)$$

qui correspond à la limite asymptotique de la probabilité pour qu'une variable Y dépasse un niveau élevé q_2 au temps h sachant que la variable X dépasse un niveau élevé q_1 au temps t_0 . La région correspond alors à l'ensemble des stations dont la dépendance de queue ainsi estimée dépasse un certain seuil. Les paramètres à choisir sont alors le temps h , les seuils q_1 et q_2 et le seuil de dépendance pour définir la région.

Une étude menée à EDF/R&D en testant les deux approches avec différents choix de paramètres sur un ensemble d'une centaine de séries de mesure du vent maximal instantané quotidien sur le territoire français métropolitain a mis en évidence la difficulté de sélection de régions homogènes et sa sensibilité à l'étape de jittérisation pour rendre la variable continue. Cependant, les résultats obtenus pour les niveaux de retour 50 ans et 200 ans sont généralement cohérents entre les différentes approches quels que soient les choix de paramètres ou la jittérisation, et comparables aux valeurs obtenues par approche locale, mais avec une incertitude réduite. Cependant, dans certains cas, on a pu mettre en évidence soit un comportement local singulier par rapport aux stations appartenant à la région, soit des différences notables entre les régions identifiées par les deux approches mises en œuvre, conduisant à des différences significatives sur les niveaux de retour estimés.

La mise en œuvre de l'analyse régionale à l'étude des vents forts est donc prometteuse et mériterait d'être approfondie. L'utilisation de séries de vitesses moyennes sur 10 min maximales quotidiennes plutôt que de vitesses maximales instantanées rendrait peut-être la définition des régions homogènes plus stable. Un travail reste en effet nécessaire sur la formation des régions homogènes, de manière à la rendre plus robuste à de faibles perturbations et plus compatible entre différentes approches.

4.1.4.3. Création / complément d'un échantillon statistique par modélisation stochastique

Un autre moyen d'enrichir les échantillons observés consiste à créer, à l'aide d'un modèle statistique ou physique, des séries temporelles aux caractéristiques équivalentes. Il est cependant nécessaire de s'assurer que le modèle utilisé représente correctement les valeurs les plus élevées.

Un exemple de modèle stochastique pour la vitesse de vent moyenne journalière a été proposé dans la thèse d'Augustin Touron [31], à partir de modèles de Markov cachés non homogènes, de façon à prendre en compte la saisonnalité. Le principe d'un modèle de Markov caché est de conditionner la génération de la variable à l'appartenance à un état. Les états sont appris à partir des données, et leur succession suit un processus de Markov. Schématiquement, la figure ci-après illustre le principe de ce type de modèle :

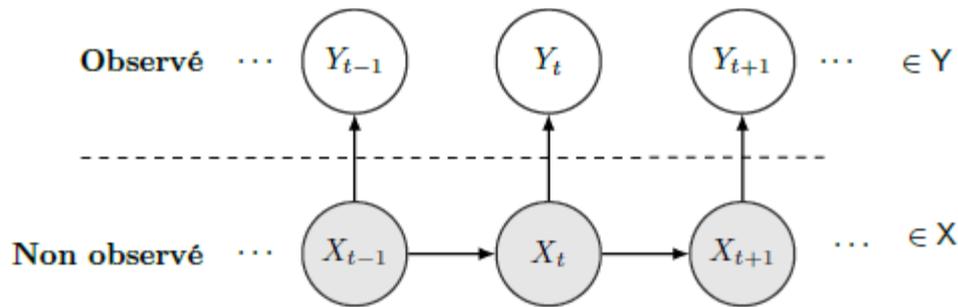


Figure 18 : Principe de la chaîne de Markov

La variable Y (le vent ici) est générée indépendamment dans chaque état X selon une loi d'émission donnée, et la dépendance temporelle est assurée par la transition entre les différents états. Le nombre d'états est un hyperparamètre du modèle, et peut être choisi selon un critère BIC (Bayesian Information Criterion) en testant différentes valeurs. Pour le vent, dans [31] la loi d'émission choisie est une loi de Weibull, et plusieurs tests ont été effectués pour la prise en compte de la saisonnalité : soit elle est prise en compte dans la matrice de transition entre états, soit dans les paramètres des lois d'émission. Les deux approches donnent des résultats comparables : le modèle présente des résultats globalement satisfaisants pour les principales caractéristiques, mais il ne reproduit pas bien la variabilité interannuelle. L'utilisation d'un tel principe de modélisation pour enrichir les échantillons dans le cas de l'estimation des extrêmes qui nous intéresse ici nécessiterait d'adapter le modèle à la représentation des moyennes 10 min maximales quotidiennes et de tester sa capacité à reproduire les extrêmes de façon satisfaisante.

4.1.4.4. Approche Bayésienne

L'approche classique décrite précédemment repose sur le comportement asymptotique en loi des variables, dont les observations forment un échantillon supposé représentatif, mais dont la taille peut ne pas être suffisante pour supposer qu'on est proche de l'asymptotisme.

L'approche bayésienne permet d'aller au-delà de cette hypothèse en introduisant la notion de crédibilité : l'idée est d'estimer, conditionnellement aux données, une zone de crédibilité qui contient les paramètres des lois avec une certaine probabilité. Le conditionnement du vecteur de paramètres aux observations implique que le vecteur de paramètres est considéré non plus comme un vecteur de paramètres fixes et inconnus, mais comme un vecteur latent aléatoire, possédant une loi mesurant l'incertitude sous-jacente au problème de modélisation.

Le procédé d'inférence consiste alors à opérer une mise à jour de cette loi conditionnellement aux observations, via la règle de Bayes. Ainsi, là où la statistique classique calcule un estimateur des paramètres (maximisant souvent la vraisemblance) qui possède une loi connue asymptotiquement, la statistique bayésienne calcule une loi a posteriori pour ces paramètres, qui transporte cette incertitude réduite par la connaissance des données de taille n fixée. Les deux approches sont consistantes lorsque n tend vers l'infini : les lois respectives du vecteur estimé par la théorie classique et la loi a posteriori des paramètres, construite par l'approche bayésienne deviennent similaires.

L'approche bayésienne permet en outre de s'intéresser directement à la quantité d'intérêt, le niveau de retour en général dans nos études, en recherchant une valeur associée à un certain niveau de crédibilité. Elle constitue en fait une théorie conjointe de la décision et de la modélisation, capable notamment de définir des estimateurs ponctuels de quantités d'intérêt (tel un niveau de retour), plus robustes que le cadre fréquentiste, sous des contraintes de conservatisme, en intégrant : (a) des connaissances ou des contraintes sur les rapports de risques associés à de mauvaises décisions (ex : sous-estimation vs surestimation d'un tel niveau) ; (b) des informations éventuellement disponibles a priori sur le phénomène.

Les principales réticences par rapport à ces approches concernent :

- le choix de la distribution a priori (prior), qui peut être vu comme l'introduction d'une forme de subjectivité ;
- l'estimation de la distribution a posteriori, qui remplace dans cette approche l'estimation des paramètres des lois dans l'approche classique, repose sur des algorithmes qui peuvent être demandeurs en termes de temps de calcul, avec une convergence pas toujours facile à prouver en pratique (toutefois, de nouvelles avancées offrent à présent un cadre très robuste pour les problèmes de faible dimension) ;
- le gain en termes de précision de l'estimation n'est pas systématique (ce gain est cependant démontré en moyenne) ;
- le choix de la fonction de coût⁴³ n'est pas toujours aisé, et l'adaptation de ces approches au contexte des extrêmes n'est pas garantie.

Parmi tous ces points, seul le premier semble aujourd'hui le plus délicat. Une approche « objective » du prior (vu comme une mesure régularisante) est possible. Les approches « subjectives » et leur contrôle font l'objet d'études approfondies, et deviennent de plus en plus consensuelles dans la communauté statistique.

Ainsi, l'application de ces approches au contexte de l'estimation d'extrêmes est un domaine de recherche actif et prometteur, dont on peut attendre des avancées intéressantes dans un avenir (très) proche - en notant que celles-ci sont déjà très utilisées dans le monde anglo-saxon.

4.1.5. Approches retenues à l'international

Parmi les approches à l'international, le GT a identifié en particulier l'approche mise en œuvre aux Etats-Unis. Pour les vents dépressionnaires (« extreme straight line wind »), la norme ANSI/ANS-2-3-2011 [71] recommande de retenir des vitesses de vent de pointe sur 3 secondes différentes pour les trois régions I, II et III des Etats-Unis. Les formules sont issues du document de référence ASCE 7-10 (chapitre C26, p 509) [72]. Pour chacune des régions, on retrouve le ratio entre vitesse des valeurs de vent instantané de probabilité 10^{-4} /an (mean return period $1.00E+04$) sur $0,02$ /an (mean return period $5.00E+01$) égal à 1,52.

⁴³ Une fonction de coût est définie lorsqu'on place l'estimation dans le cadre de la prise de décision. La décision consiste à retenir une valeur unique de la quantité d'intérêt. Elle est alors prise de façon à minimiser les coûts de différents types d'erreur (surestimation ou sous-estimation) sur cette valeur.

Region I data				
Straight line wind			Tornado	
Mean return period (years)	1) 2)	Miles per hour	Mean return period (years) ³⁾	Miles per hour
1.00E+04 ⁴⁾	1.52 × 90 =	137	1.00E+07 =	230
1.00E+03	1.30 × 90 =	118	1.00E+06 =	200
5.00E+02	1.23 × 90 =	111	1.00E+05 =	170
2.00E+02	1.14 × 90 =	103		
1.00E+02	1.07 × 90 =	96		
5.00E+01	1.00 × 90 =	90		
1.00E+01	0.84 × 90 =	76		



Figure 19 : Figure 1 et Table 3 de la norme ANSI [71], cas de la région I

D'autres pratiques internationales ont pu être ponctuellement identifiées (Australie, Japon), sans qu'une recherche exhaustive n'ait été menée par le GT. Le rapport [73] a été identifié sous un format provisoire (« final draft »). Les éléments concernant les vents forts concernent les pratiques en Amérique du Nord, avec des différences par rapport aux pratiques européennes (par exemple l'étude sur des données de vent instantané ou la prolongation des courbes d'extrapolation pour des probabilité de dépassement très inférieures à $10^{-4}/\text{an}$).

En Europe, l'approche Eurocode assure une certaine homogénéité avec l'approche retenue par le CSTB pour l'annexe nationale française de l'Eurocode.

4.1.6. Conclusions et préconisations du GT

Les études statistiques peuvent être menées sur différents types de données, pouvant avoir fait l'objet de traitements spécifiques. Notamment, une correction de l'influence locale de la mesure peut être nécessaire pour respecter les conditions de référence définies dans l'Eurocode 1-4 (mesure à 10 m de hauteur, rugosité de catégorie II (équivalent « rase campagne ») et absence d'obstacle aux alentours). Une telle correction permet de donner une signification régionale aux résultats statistiques et permet ainsi les comparaisons entre les stations météorologiques et la construction d'une carte. Le GT souligne à ce sujet que le respect de ces conditions de référence est nécessaire pour recourir à l'Eurocode.

De façon générale, il convient que le type de données retenues soit adéquat vis-à-vis de l'étude menée.

Concernant l'évaluation des niveaux de vents extrêmes par extrapolation statistique, le GT s'est accordé sur les points suivants :

- le bruitage, aussi appelé jittérisation, est une bonne pratique pour l'étude des données de vent lorsque celles-ci sont des données arrondies,
- pour plusieurs problématiques (vérification des hypothèses, choix du seuil, intervalles de confiance...), il est préférable de ne pas imposer une procédure systématique, de tester différentes hypothèses, de mener des vérifications visuelles des résultats et enfin d'explicitier et de justifier les choix opérés ;
- il n'y a pas de consensus sur le nombre de paramètres à retenir de façon générale pour le vent. Le choix reste à justifier pour chaque cas d'étude.

Compte tenu des limites des études actuelles, le GT constate que les niveaux d'extrapolation atteignable pour les vents sont limités à une période de retour comprise entre 50 et 200 ans (soit entre $2,10^{-2}$ et $5.10^{-3}/\text{an}$) et ne permettent pas d'atteindre l'objectif cible WENRA à $10^{-4}/\text{an}$.

Parmi les nouvelles approches qui se développent en statistiques des extrêmes, les approches régionales apparaissent intéressantes à investiguer et à appliquer à des vitesses de vents moyennés sur 10 minutes (en conditions de référence). En attendant, le GT considère nécessaire de croiser dans la mesure possible, les

études statistiques issues de plusieurs stations pour mener de nouvelles évaluations des vitesses de vent extrêmes.

La suite de cette partie présente les options de majoration discutées au sein du GT visant à 'atteindre la cible WENRA.

4.2. Majoration permettant d'atteindre la cible WENRA

Les échanges lors des réunions du GT, en particulier lors des réunions de 28 mai 2021 et du 8 avril 2022 ont permis de converger vers la rédaction d'une proposition commune des membres du GT décrite ci-après.

Le GT préconise de définir le vent de référence WENRA à partir d'un vent moyen cinquantennal représentatif des conditions de références définies dans l'Eurocode et pondéré par un facteur de majoration multiplicatif.

Le vent moyen cinquantennal peut être établi :

- à partir de la carte nationale de référence de l'Eurocode 1-4 ou,
- à partir d'une étude statistique tenant compte de plusieurs stations météorologiques localisées à proximité du site d'étude.

Dans le second cas, le GT souligne que l'étude statistique devrait être menée sur des observations de vent moyen 10 minutes validées et représentatives des conditions de références définies dans l'Eurocode 1-4. La valeur retenue devrait couvrir les incertitudes d'échantillonnage, ce qui peut être fait en intercomparant les observations issues de plusieurs stations météorologiques et en retenant la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 % de la valeur cinquantennale estimée.

Dans une telle approche, l'exploitant cherchera à utiliser autant que possible les observations disponibles les plus récentes et les observations disponibles sur sites (sous réserves que ces mesures soient de bonne qualité).

Le facteur de majoration est a priori commun à l'ensemble des sites. Une valeur spécifique pourrait être retenue sur certaines zones pour lesquelles un comportement régional notable est identifiable, sous réserve de justifications. A ce stade, une telle zone pourrait concerner le pourtour méditerranéen ainsi que des sites de la vallée du Rhône.

Plusieurs valeurs de majorations ont été discutées au sein du GT comprises entre 1,3 et 1,5.

La valeur de vent de référence WENRA devrait en tout cas couvrir les records observés sur site et de la « région météorologique » (ensemble de sites présentant une certaine homogénéité météorologique).

La suite de cette partie présente les commentaires que les membres du GT ont souhaité formuler sur cette proposition.

Éléments transmis par EDF le 31/08/2022 :

En préambule, EDF souligne l'absence, en l'état actuel des connaissances, de méthode scientifiquement validée pour estimer précisément des niveaux d'aléas de période de retour 10 000 ans pour le vent. Pour les vérifications concernant le parc existant, il utilise des outils (en particulier les codes Neige et Vent) et des méthodes différentes. Au vu des fortes incertitudes pour estimer des niveaux correspondant à des périodes de retour de 10 000 ans, quelle que soit la méthode retenue, EDF souhaite conserver sa méthode actuelle pour les vérifications concernant le parc existant, basée sur la définition de vitesses associées à des périodes de retour de 200 ans auxquelles on ajoute une marge.

L'usage d'une période de retour plus grande que 50 ans permet d'extrapoler au mieux les données disponibles, qui recouvrent une période de plus de quarante ans sur la plupart des sites de référence EDF.

L'usage d'une marge plutôt que d'un facteur multiplicatif est justifié par le caractère borné du vent, mal retranscrit dans le facteur multiplicatif qui linéarise au lieu d'aller vers l'asymptote.

Pour le nouveau nucléaire, il est entendable d'utiliser un coefficient multiplicatif par souci de simplification, même si cette méthode n'est pas plus fiable que celle des marges.

La démarche d'EDF consiste à évaluer pour chaque site un coefficient multiplicatif qui sera appliqué au vent cinquantennal.

Pour chaque site, le coefficient correspond au ratio entre la vitesse de pointe « 200 ans » de l'étude CSTB majorée de 20 km/h calculée sur le site et la vitesse du vent extrême calculée sur le site, issue des règles NV 65. Pour le site de Flamanville présenté en réunion⁴⁴, ce coefficient atteint 1,37.

Il est cohérent avec la reprise par l'IRSN de l'étude CSTB réalisée pour 8 sites EDF, où les ratios V10 000 / V50 obtenus sont compris entre 1,29 et 1,35, avec une moyenne à 1,32⁴⁵.

EDF rappelle par ailleurs que le ratio V10 000 / V50 calculé par la formule de l'Eurocode est égal à 1,23⁴⁶. Même si cette extrapolation n'est pas possible pour de telles périodes de retour, on peut estimer qu'une valeur adaptée est de l'ordre de 1,3. En effet, la valeur 1,23 du coefficient de probabilité Cprob pour un vent 10 000 ans est déterminée avec le paramètre de forme K=0,15. Or cette valeur est recommandée par l'annexe nationale pour des probabilités de dépassement supérieures à 0,02 (donc une période de retour inférieure à 50 ans). Pour des périodes de retour supérieures à 50 ans, il pourrait être considéré que la valeur K=0,2, recommandée par la norme européenne EN 1991-1-4 (Eurocode 1-4), portant la valeur du coefficient de probabilité à 1,26.

*EDF estime que la majoration de 1,4 voire 1,5 serait une majoration trop importante, conduisant à des vents WENRA qui dépasseraient la valeur de vent de la tornade de référence (55 m/s en vitesse instantanée). **EDF propose la valeur de majoration 1,3 comme valeur enveloppe.***

EDF souligne également son souhait :

- *de privilégier le traitement des stations locales pour s'affranchir du caractère trop enveloppe d'une approche nationale ;*
- *d'avoir une détermination différenciée de coefficient multiplicatif selon les sites. En effet, un coefficient commun pour tous les sites n'est pas cohérent avec la réalité, les caractéristiques étant a minima définissables par région. Ainsi, par exemple, le vent en vallée du Rhône présente un caractère beaucoup plus borné qu'en bord de Manche.*

Éléments transmis par le CEA le 23/09/2022

Le CEA considère qu'un coefficient multiplicateur de 1,3 est cohérent et majorant avec le coefficient Cprob défini pour un vent décennal dans l'Eurocode 1 partie 1-4 et son projet de révision. Une valeur de 1,4 conduirait à doubler la pression dynamique du vent cinquantennal et apparaît donc trop importante pour le CEA. La valeur de 1,5, trop éloignée du coefficient Cprob défini dans l'Eurocode, ne serait pas cohérente avec la carte

⁴⁴ cf. CR PSE-ENV/SCAN/2021-00046 de la réunion du 8 avril 2022

⁴⁵ cf. CR PSE-ENV/SCAN/2021-00067 de la réunion du 28 mai 2021

⁴⁶ Nota IRSN : Le coefficient Cprob présenté dans l'Eurocode n'a pas été présenté en détail dans le rapport car il n'est pas destiné à une extrapolation des vitesses de vent pour les grandes périodes de retour. Deux experts du GT liés au CSTB ont indiqué à ce sujet dans leurs commentaires du rapport que l'utilisation du coefficient Cprob en extrapolation pour des périodes de retour rares est très hasardeuse. Le coefficient de probabilité de l'Eurocode est construit pour interpoler une loi de Gumbel « moyenne » dans le domaine des périodes de retour inférieures à 50 ans.

de vent cinquantennal de l'Eurocode et semble disproportionnée en multipliant par 2,25 la pression dynamique du vent cinquantennal.

Eléments transmis par ORANO

ORANO considère qu'une utilisation de coefficients de pénalisation trop importants, sur des bases théoriques ne pouvant être établies de façon rigoureuse, risque de conduire à une mauvaise allocation des ressources, voire à écarter certaines solutions techniques. **Une valeur de 1,3 en l'état actuel apparaît préférable par défaut**, apportant une pénalisation sensible d'environ 70 % sur la pression, dans l'attente d'études complémentaires (le cas échéant par analyses contradictoires de données disponibles), permettant de préciser d'éventuels critères pouvant influencer sur le choix de la majoration à retenir vis-à-vis de la définition de l'aléa (région, durée d'observation sur site). Par ailleurs, le coefficient de pénalisation à retenir mérite d'être mis en regard des enjeux de sûreté.

Eléments apportés par l'IRSN

L'IRSN soutient la proposition commune et a proposé un coefficient de majoration égal à 1,5. Cette proposition repose sur les éléments suivants :

- la valeur 1,5 est enveloppe des évaluations « best estimate » disponibles des ratios $V_{10\ 000} / V_{50}$ (ratio moyen de 1,32 selon une étude CSTB sur 8 stations, ratio compris entre 1,39 et 1,44 (valeur moyenne à 1,41) pour l'étude IRSN menée sur une centaine de stations⁴⁷), l'IRSN reconnaît que ces valeurs reposent sur des calculs hors du domaine de validité des extrapolations statistiques mais, en l'absence d'information permettant de définir une limite physique aux phénomènes des vents forts, considère prudent que la majoration couvre ces valeurs de ratio;
- l'« arrondi » à une valeur 1,5 permet de couvrir des incertitudes associées à l'utilisation d'une valeur cinquantennale issue de l'annexe nationale de l'Eurocode 1-4, à laquelle des incertitudes de l'ordre de 2 m/s sont attribuées (cf. 4.3.1) ;
- In fine et en réflexion a posteriori, la valeur de 1,5 permet également de mieux couvrir le phénomène des rafales convectives non pris en compte par une situation de référence spécifique compte tenu de l'absence de connaissance suffisante concernant à la fois le phénomène et la caractérisation des effets sur les structures (cf. 4.9).

L'IRSN note par ailleurs que cette valeur de majoration de 1,5 est proche de celle évaluée pour les vents dépressionnaires (« extreme straight line wind ») aux Etats-Unis ($V_{10\ 000}/V_{50} = 1,52$ selon la norme ANSI/ANS-2-3-2011 [71]).

4.3. Démarche Eurocode pour l'étude des effets du vent sur les structures de génie civil

Pour les vents dépressionnaires, l'Eurocode fournit un état de pratique allant d'un aléa de vent moyen sur 10 minutes à l'établissement d'une pression dynamique de pointe utilisée pour le calcul des actions du vent. Cette partie présente la démarche de l'Eurocode 1-4 et son annexe nationale française pour calculer la pression dynamique de pointe à partir de la vitesse du vent puis les actions du vent sur les structures.

⁴⁷ Cf. CR PSE/ENV/SCAN//2021-00067 de la réunion du 28 mai 2021, l'écart entre résultats CSTB et IRSN s'explique en grande partie par le fait de mener l'extrapolation statistique sur des données de vitesse ou de pressions dynamiques, ces dernières évoluant avec le carré de la vitesse.

Pour rappel, parmi les deux types de mesures de vent classiquement réalisés : les maxima de vitesses de vent moyennées sur 10 minutes et vitesses maximales des vents instantanées, l'Eurocode a fait le choix de recourir à des vitesses de vent moyennées sur 10 min.

Cette partie a été rédigée principalement par le CTICM et J. Biétry, complétée par le CEA.

4.3.1. Valeur de base de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$

Le calcul des actions du vent sur un bâtiment commence par la détermination de la valeur de base de la vitesse de référence du vent. La valeur de base de la vitesse de référence du vent, $v_{b,0}$ est la vitesse moyenne sur une durée de 10 minutes, à une hauteur de 10 m au-dessus du sol en terrain dégagé de type « rase campagne ». Elle a une probabilité de dépassement sur une période d'un an égale à 0,02, toutes directions de vent confondues, ce qui se traduit par une période de retour de 50 ans. Elle dépend de la position géographique du bâtiment et s'obtient par lecture des cartes Eurocodes.

La carte présentée ci-après a été établie par interpolation (krigeage) de la vitesse cinquantennale dans 146 stations météorologiques sélectionnées avec l'aide de Météo-France. Les mesures dans ces stations ont été éventuellement corrigées pour les ramener aux conditions fixées par l'Eurocode, rappelées ci-dessus. Les calculs d'extrapolation statistiques sont ceux de l'étude statistique du CSTB de 2005 [19] utilisant les méthodes décrites auparavant au § 4.1.

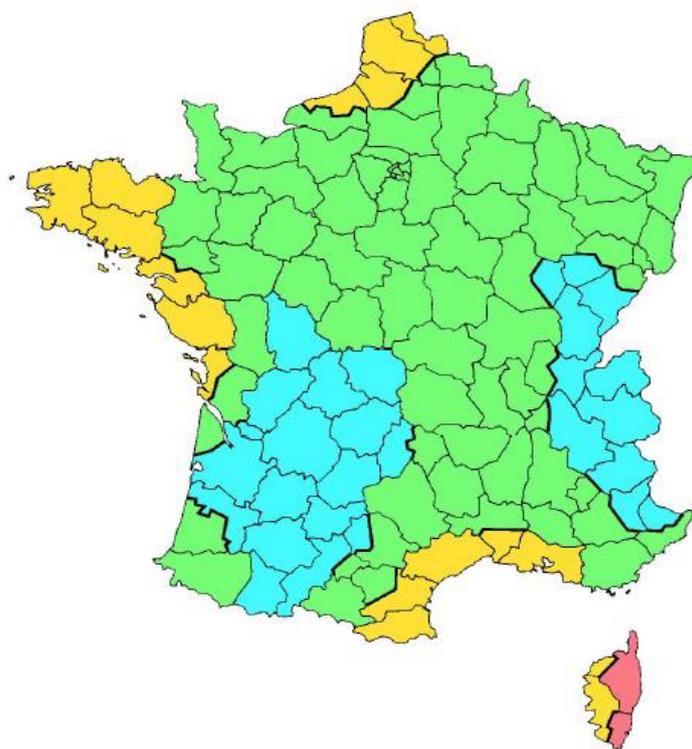


Figure 20 : Carte de la valeur de base de la vitesse de référence en France métropolitaine (annexe nationale française issue de l'étude statistiques du CSTB [19])

Tableau 8. Valeur de base de la vitesse de référence du vent (métropole)

Régions	$v_{b,0}$ (m/s)
1	22
2	24
3	26
4	28

Une incertitude (i.e. un écart-type) de l'ordre de 2 m/s a été attribuée aux valeurs de la carte de l'annexe nationale de l'Eurocode 1-4. Cet ordre de grandeur résulte de la comparaison des vitesses cinquantennales obtenues dans des stations proches, par exemple aux sept stations d'Ile de France. La petitesse géographique de cette région comparée aux dimensions des tempêtes dépressionnaires, incite à penser que ces sept stations ont le même vent cinquantennal et que les variations observées d'une station à l'autre ont une origine statistique inévitable (l'incertitude « d'échantillonnage ») et peuvent également refléter une incertitude sur les corrections apportées aux données pour tenir compte des conditions locales de mesures.

L'annexe nationale de l'Eurocode 1-4 indique « *La carte de la vitesse de référence du vent en France a été établie sur la base d'une étude statistique des données météorologiques enregistrées dans un grand nombre de stations. Les mesures de mauvaise qualité, notamment celles obtenues avec l'anémomètre ancien à quatre coupelles, ont été écartées. Les mesures retenues ont ensuite été corrigées spécifiquement par direction de vent, lorsque l'environnement de mesures s'écartait des conditions de référence. Enfin, l'analyse n'a porté que sur les stations disposant d'au moins 15 années de mesures. Malgré ces précautions, l'incertitude, inévitable et inhérente au processus statistique, est de l'ordre de 10 % sur la vitesse de référence en un lieu donné. C'est pourquoi les études statistiques entreprises spécifiquement pour un projet ne sont pas recommandées, dans la mesure où elles peuvent sous-estimer, voire méconnaître les problèmes de qualité des données météorologiques et les incertitudes liées aux méthodes employées.* ».

Concernant la carte nationale de référence de l'Eurocode 1-4, le GT a noté qu'une mise à jour était envisagée par le CSTB. Compte tenu de la modeste profondeur des données disponibles lors de l'étude support à cette carte, il serait utile de mener de nouvelles études statistiques qui porteraient sur des échantillons de taille quasi doublée (une quarantaine d'années au lieu d'une vingtaine).

4.3.2. Vitesse de référence du vent v_b :

A partir de la vitesse de référence de base $v_{b,0}$, on détermine la vitesse de référence du vent v_b en tenant compte de la direction des vents dominants et de l'éventuel caractère temporaire de la construction ou d'une phase d'exécution :

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

- Coefficient de direction c_{dir}

Le coefficient de direction prend en considération la direction des vents dominants en fonction de la région de la construction. Il permet de réduire la vitesse du vent $v_{b,0}$ sur une face d'un bâtiment. Par conséquent, ce coefficient peut être pris égal à 1, ce qui place le calcul du côté de la sécurité.

- Coefficient de saison c_{season}

Le coefficient de saison permet également de réduire la vitesse du vent $v_{b,0}$ lorsque la durée de vie d'un ouvrage est faible. En effet, le risque de vents forts est, pour la métropole, plus faible d'avril à septembre. Aussi pour les constructions provisoires ou en phase d'exécution, en fonction du lieu de construction, ce coefficient peut avoir une valeur inférieure à 1. De même, pour les départements d'outre-mer exposés aux cyclones tropicaux, les saisons de vents forts correspondent au passage des cyclones. Le coefficient peut être pris égal à 1 de manière sécuritaire.

4.3.3. Vitesse moyenne v_m

La vitesse moyenne du vent $v_m(z)$ à une hauteur z au-dessus du sol dépend de la rugosité du terrain et de l'orographie, dans la direction d'où vient le vent ainsi que de la vitesse de référence du vent, v_b , et il convient de la déterminer à l'aide de l'expression :

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b$$

4.3.3.1. Coefficient de rugosité $c_r(z)$:

Le coefficient de rugosité prend en considération la rugosité du terrain entourant la construction. Celle-ci a un impact sur la vitesse du vent. La rugosité varie en fonction des obstacles présents au sol tels que le type de végétation, la hauteur des arbres ainsi que la densité de ceux-ci mais également la présence ou non de zone urbaine.

Le coefficient de rugosité suit la formule :

- $c_r(z) = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$ pour $z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m}$
- $c_r(z) = c_r(z_{min})$ pour $z \leq z_{min}$

Les valeurs z_0 et z_{min} dépendent de la catégorie de terrain (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 9. Valeurs de z_0 et z_{min} en fonction de la catégorie de terrain (issus de l'Eurocode 1-4)

Catégories de terrain	Z_0 (en m)	Z_{min} (en m)
0 - Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5km	0,005	1
II - Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0,05	2
IIIa - Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0,20	5
IIIb - Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0,5	9
IV - Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15m ; forêts	1,0	15

4.3.3.2. Détermination de la catégorie de terrain :

Le rayon R à considérer autour de la construction de hauteur h pour déterminer la ou les catégories de terrain est donnée par la formule : $R = 23 h^{1,2}$ avec $R > 300 \text{ m}$.

Ensuite pour chacune des faces de la construction, on considère un secteur de 90° ($\pm 45^\circ$ par rapport à la normale). Dans ce secteur, la catégorie de terrain retenue devra être représentative sur un secteur d'au moins 30° . Si plusieurs catégories de terrain sont représentées, il faudra prendre celle avec le plus petit z_0 .

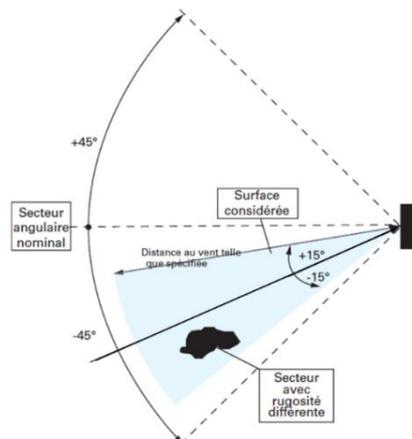


Figure 21 : Schéma pour la détermination de la catégorie de terrain

Pour chacune des faces d'un bâtiment, il peut y avoir une catégorie de terrain spécifique. Un bâtiment a donc la possibilité d'avoir plusieurs catégories de terrain.

4.3.3.3. Coefficient d'orographie $c_o(z)$

Le coefficient d'orographie permet de prendre en considération la complexité des reliefs du terrain avoisinant la construction. Le coefficient orographique $c_o(z)$ est généralement pris égal à 1, notamment lorsque la pente moyenne du terrain au vent est inférieure à 3°. Il convient cependant de tenir compte de l'orographie lorsqu'elle est constituée d'obstacles bien individualisés ou multiples de formes variées. L'annexe nationale donne des méthodes permettant d'évaluer l'influence de l'orographie sur la vitesse du vent.

En particulier, elle différencie le cas d'une orographie constituée d'obstacle de hauteurs et de formes variées, le plus fréquemment rencontré, du cas constitué d'obstacles bien individualisés (collines isolées ou en chaîne, falaise, escarpement). Pour les deux cas de figures, des procédures de calculs à partir des caractéristiques de l'orographie sont définies. Dans le 1^{er} cas, la clause 4.3.3 de l'annexe nationale indique que le calcul du coefficient d'orographie est également possible par une modélisation numérique appropriée ou par une étude sur maquette en soufflerie turbulente. Ces approches alternatives aux formules de procédures de l'Eurocode sont détaillées dans la partie suivante du rapport (§ 4.4).

En complément de l'orographie du site, l'Eurocode présente deux courts paragraphes concernant des constructions avoisinantes de grandes dimensions et de hauteur bien plus élevée et les bâtiments et obstacles rapprochés. Ces aspects font l'objet de procédures de calculs. Néanmoins, l'annexe nationale limite la prise en compte des effets aux bâtiments de plus de 30 m pour les bâtiments de grande dimension et indique qu'il n'y a pas lieu de tenir compte de l'effet de bâtiments et autres obstacles rapprochés.

4.3.4. Intensité de turbulence du vent I_v

L'atmosphère présente un caractère turbulent, le vent étant le siège de fortes fluctuations d'intensité (par exemple les rafales). L'intensité de la turbulence du vent $I_v(z)$ à la hauteur z est définie comme l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent $V_m(z)$.

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} \text{ pour } z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ pour } z \leq z_{min}$$

Elle caractérise l'intensité des fluctuations de vitesse. Elle peut se calculer comme suit :

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ pour } z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m}$$

Le coefficient de turbulence est donné par : $k_l = c_0 [1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6]$, sauf en site plat et dans le cas d'orographie constituée d'obstacles bien individualisés, ou le coefficient de turbulence est donné par :

$$k_l = [1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6]$$

4.3.5. Pression dynamique de pointe q_p

La pression dynamique est une mesure de l'énergie cinétique d'un fluide par unité de volume. Ainsi, le vent exerce une pression proportionnelle à sa vitesse au carré s'il rencontre un obstacle.

La pression dynamique de pointe $q_p(z)$ s'obtient à partir de la vitesse moyenne et de l'intensité de turbulence :

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v] \times \frac{1}{2} \rho v_m^2 ;^{48}$$

⁴⁸ Indiquer que la nouvelle version de l'Eurocode [13], la formulation a évolué en se référant à une vitesse de pointe $v_p(z) = v_m(z) \cdot (1 + k_u \cdot I_u(z))$

Toutefois, cette formule peut également se mettre sous une forme faisant apparaître le coefficient d'exposition C_e :

$$q_p(z) = C_e \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

Ce coefficient est donné sous forme d'abaque dans l'Eurocode, ce qui permet un calcul rapide.

A noter que **dans le futur Eurocode [13], la pression dynamique de pointe $q_p(z)$ est calculée en deux étapes** :

- d'abord le calcul de la vitesse de pointe $v_p(z)$ $v_p(z) = v_m(z) \cdot (1 + k_u \cdot I_v(z))$
avec un facteur de pointe $k_u = 2,8$ couramment admis sur une base expérimentale,
- puis le calcul de la pression dynamique de pointe $q_p(z)$ $q_p(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_p^2(z)$.

La formulation de l'Eurocode actuel repose sur une approximation qui néglige le carré $I_v^2(z)$ mais adopte un facteur de pointe plus élevé égal à 3,5.

4.3.6. Actions du vent sur les structures

Le vent exerce sur les constructions :

- des **pressions aérodynamiques** fluctuantes locales, dont les valeurs extrêmes (maximum des surpressions, minimum algébrique des dépressions ou « succions ») sont utilisées pour la vérification des éléments de façade et de toiture, et de leurs fixations ;
- des **forces aérodynamiques** qui sont de trois types :
 - **forces générées par le vent turbulent.**

Ces sont les résultantes des champs de pressions aérodynamiques fluctuantes. Ces forces fluctuantes peuvent exciter à la résonance les premiers modes propres de vibration des structures, si la fréquence propre de ces modes est assez basse pour que l'excitation par la turbulence soit significative. Il est à noter que la densité spectrale de la turbulence décroît avec la fréquence n comme $n^{-2/3}$.

- **forces générées par le détachement tourbillonnaire alterné.**

Dans le sillage de certaines constructions telles que les cheminées, on observe le détachement périodique alterné (d'un côté puis de l'autre) de tourbillons. De ce balancement du sillage, il résulte une force latérale périodique, perpendiculaire au vent moyen, qui peut exciter à la résonance un mode de vibration de la structure lorsque la fréquence du détachement tourbillonnaire (proportionnel à la vitesse du vent) coïncide avec celle du mode propre. Dans ce cas, les déplacements latéraux de la construction qui en découlent, créent de nouvelles forces « aéroélastiques », par interaction des déplacements avec le vent, qui jouent un rôle défavorable. Lorsque ces phénomènes ont lieu pour des vitesses de vent modérées donc relativement fréquentes, un endommagement de la structure par fatigue est, en outre, à considérer.

- **forces aéroélastiques.**

Ces forces résultent de l'interaction du vent et des déplacements de la construction. Elles ne concernent donc que des structures suffisamment souples pour que leurs déplacements soient significatifs. Les forces aéroélastiques peuvent avoir une influence favorable, par exemple lorsqu'elles « consomment » de l'énergie vibratoire (par exemple, amortissement aérodynamique positif, contribuant à la réduction des vibrations). Mais parfois, elles contribuent à accentuer la vibration et peuvent être interprétées comme un amortissement aérodynamique négatif, croissant (en module) avec la vitesse du vent. Au-delà d'une vitesse critique du vent, une instabilité « aéroélastique » survient alors, entraînant la destruction de la construction (exemple du pont suspendu de Tacoma en 1940).

4.3.7. Pressions et forces engendrées par le vent turbulent

4.3.7.1. Un exemple de mesures de pressions

La figure suivante présente des enregistrements synchrones, sur 60 secondes, de la vitesse du vent incident et des pressions mesurées sur une construction réelle d'étude (mobil home) orientable.

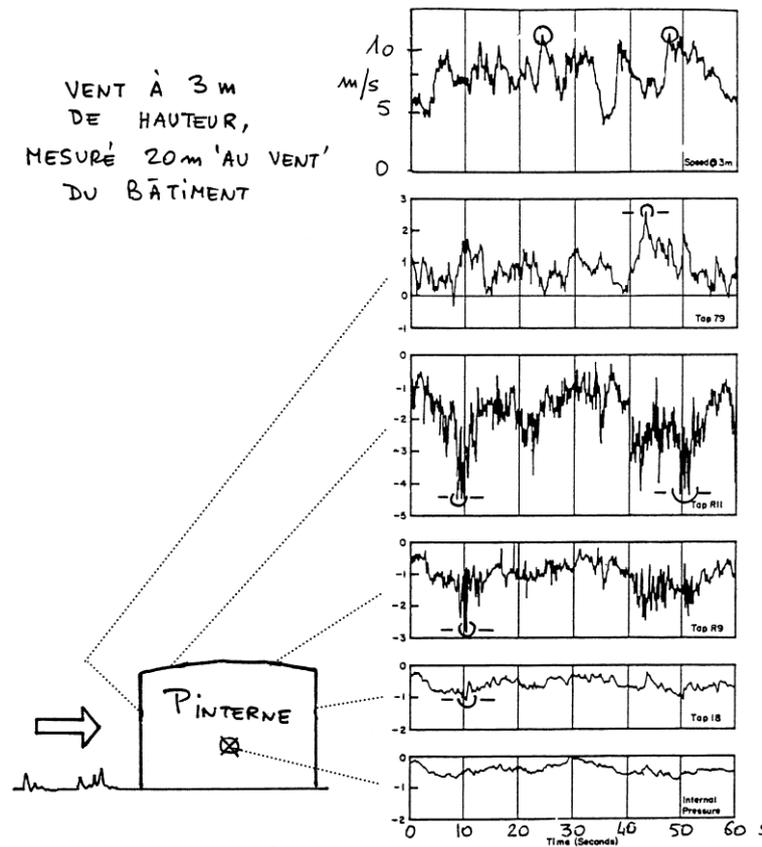


Figure 22 : Mesures synchrones de pressions aérodynamiques sur une construction (mesures National Bureau of Standards, USA, archives J. Biétry)

Les pressions sur la face au vent sont positives (« enfoncement » de la paroi) ; sur le toit et la façade sous le vent, les pressions sont négatives (dépressions ou « succions » de la paroi). Les pressions sont exprimées en valeurs réduites, après normalisation avec la même pression de référence. Les valeurs de pointe sont repérées par un cercle.

Ces enregistrements illustrent le caractère fondamentalement aléatoire de la vitesse du vent incident et des pressions engendrées. Les dépressions sur les parois latérales (ici le toit) peuvent être largement supérieures (en module) aux surpressions de la face au vent ; et elles ont un « faciès » différent. Sur une paroi telle que le toit, les dépressions ne sont pas les mêmes près du bord « au vent » ou près du bord « sous le vent ».

Les surpressions et les dépressions n'atteignent pas simultanément leurs valeurs extrêmes. La pression interne est ici faible et peu variable ; sa valeur résulte des entrées/sorties d'air par les petites ouvertures (fuites) autour des menuiseries et portes, fermées lors des mesures. Il en aurait été tout autrement si une grande ouverture avait existé sur la face au vent : on aurait observé à l'intérieur quasiment la même surpression que sur la façade au vent. Cette surpression aurait largement contribué au soulèvement du toit sollicité, à l'extérieur, par les fortes dépressions.

4.3.7.2. Coefficients aérodynamiques dans l'Eurocode

Les valeurs extrêmes des pressions aérodynamiques et des forces qui en résultent, ne sont pas facilement accessibles actuellement par la simulation numérique car il faut respecter un certain nombre de conditions aujourd'hui encore très coûteuses et non complètement maîtrisée, ni en soufflerie de type « aéronautique » où la turbulence est quasi nulle. Il faut recourir aux études sur maquette en soufflerie turbulente (dite aussi « soufflerie à couche limite ») simulant le vent naturel et sa turbulence.

Les mesures de pressions extrêmes $P_{p,S}$ en soufflerie (indice S) sont rapportées à une pression dynamique q_S utilisée comme référence. On obtient ainsi le coefficient de pression C_p : $C_p = \frac{P_{p,S}}{q_S}$

Le coefficient de pression C_p , sans dimension, aura sensiblement la même valeur en vraie grandeur (indice VG) si le point considéré en grandeur réelle correspond au point étudié sur la maquette et si les conditions de vent incident (direction, intensité de turbulence, gradient vertical de vitesse moyenne) sont identiques. On pourra alors écrire :

$$P_{p,VG} = C_p \cdot q_{VG}$$

NOTE : les valeurs extrêmes des pressions mesurées en soufflerie restent des variables aléatoires, comme en vraie grandeur. On a l'habitude d'observer les pointes en soufflerie sur l'équivalent de deux heures de temps en vraie grandeur, soit 12 séquences de 10 minutes, et de faire une moyenne des 12 valeurs.

Mais la définition de la pression dynamique utilisée comme référence pour la normalisation des mesures en soufflerie, est a priori conventionnelle. En soufflerie turbulente, pour l'étude d'un projet particulier, on utilise très généralement la pression dynamique moyenne à une hauteur choisie pour la facilité de mesure et du rattachement à la grandeur réelle. Ce choix n'est pas le meilleur si on vise une application par voie de code à des constructions dont on ne connaît pas a priori la localisation, donc pas non plus les conditions de rugosité du terrain. Avec un même vent de tempête en altitude, on observera près du sol une diminution de la vitesse moyenne du vent au passage d'une faible à une forte rugosité et en même temps une augmentation de la turbulence qui compense partiellement l'effet précédent, en termes de vitesse de pointe ou de pression de pointe. Ainsi, en utilisant une pression dynamique de pointe pour normaliser les pressions mesurées en soufflerie, on minimise largement l'influence de la rugosité sur les coefficients de pression. L'Eurocode, comme toutes les autres règles existantes, définit grâce à ce choix des coefficients de pression indépendamment de la rugosité du terrain.

La hauteur à laquelle il convient de calculer la pression dynamique de pointe associée à un coefficient de pression est systématiquement indiquée dans l'Eurocode. Cette hauteur est en général celle de la construction considérée, mais il y a des exceptions ; par exemple, dans le cas d'une construction verticale élancée, il est demandé de considérer plusieurs tronçons et de leur associer des pressions dynamiques de pointe calculées pour la hauteur de chacun.

On retiendra donc que les valeurs numériques des coefficients aérodynamiques en provenance de différentes sources (littérature, codes de calcul, etc.) ne sont pas interchangeables. Ces coefficients doivent être issus de valeurs extrêmes mesurées en soufflerie turbulente (ce n'est pas le cas des coefficients rassemblés dans les règles NV 65). En outre, les conditions définissant la pression dynamique qui leur est associée, doivent être respectées.

Certaines structures de faibles dimensions par rapport à l'échelle de la turbulence (par exemple profilés, structures en treillis, etc.) peuvent être étudiées plus simplement. On peut supposer que les pressions et forces engendrées par le vent correspondent à chaque instant à ce qu'elles seraient en régime aérodynamique établi, pour un vent de même vitesse. Cette hypothèse conduit à associer les pressions et forces extrêmes aux vitesses extrêmes du vent, donc à la pression dynamique de pointe. Les coefficients aérodynamiques obtenus en soufflerie non-turbulente (« aéronautique ») sont alors utilisables.

Les coefficients aérodynamiques appropriés à une construction se présentent sous différentes formes :

- coefficients de pression extérieure,
- coefficient de pression intérieure, qui est une sorte de moyenne spatiale pondérée des pressions extérieures au droit des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment,
- coefficient de pression nette qualifiant directement l'écart de pression nette entre les deux faces d'une paroi (toiture isolée par exemple),
- coefficient de frottement, faible mais qu'il faut considérer dans le cas de grandes surfaces (toiture des grands centres commerciaux par exemple) balayées par le vent,
- coefficient de force permettant d'estimer directement les forces aérodynamiques sans passer par les pressions exercées par le vent.

4.3.7.3. Extrait de l'Eurocode : exemple des murs verticaux des bâtiments

Pour illustration, les deux figures suivantes sont extraites de l'Eurocode ; elles concernent les murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire.

La première figure précise et illustre la hauteur z_e pour laquelle doit être calculée la pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$, selon les proportions hauteur/largeur du bâtiment.

La seconde figure précise le découpage des murs de façade en 3 à 5 zones de pression, selon les proportions du bâtiment.

Le tableau 7.1 de l'Eurocode indique enfin, pour chaque zone, les valeurs des coefficients de pression extérieure c_{pe} à retenir.

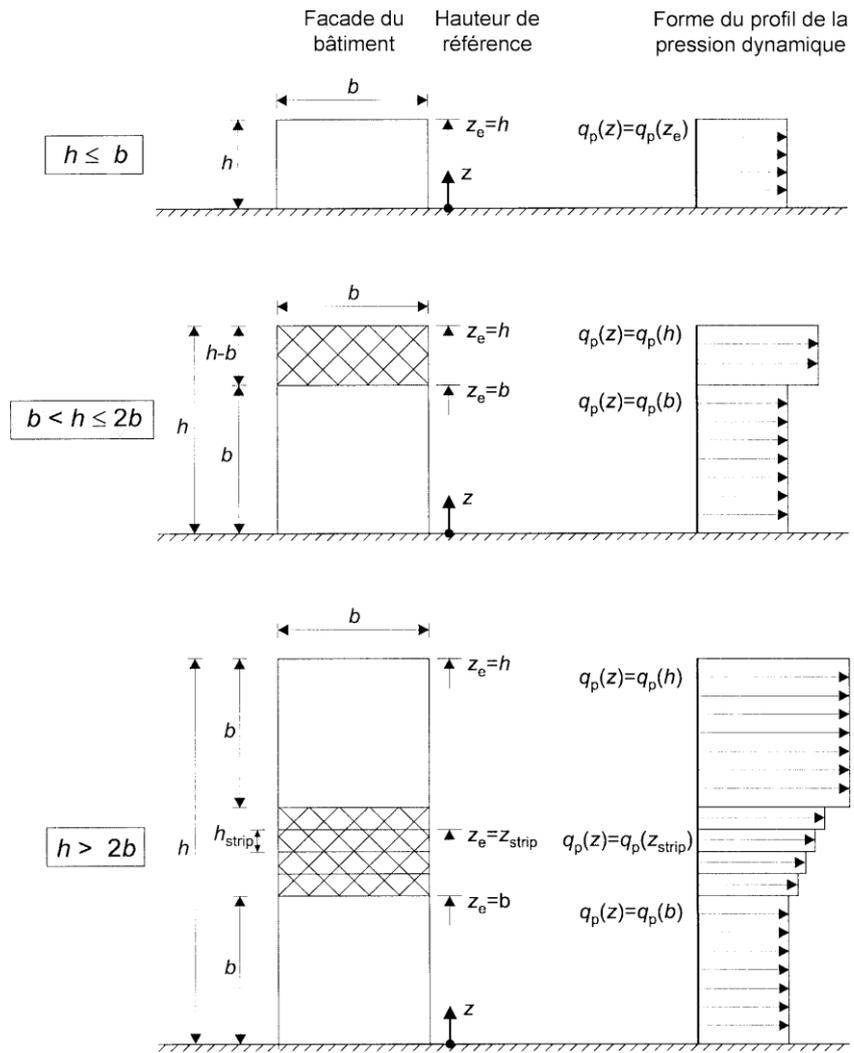


Figure 23 : Hauteur de référence, z_e , dépendant de h et b , et profil correspondant de pression dynamique (extrait Eurocode 1-4)

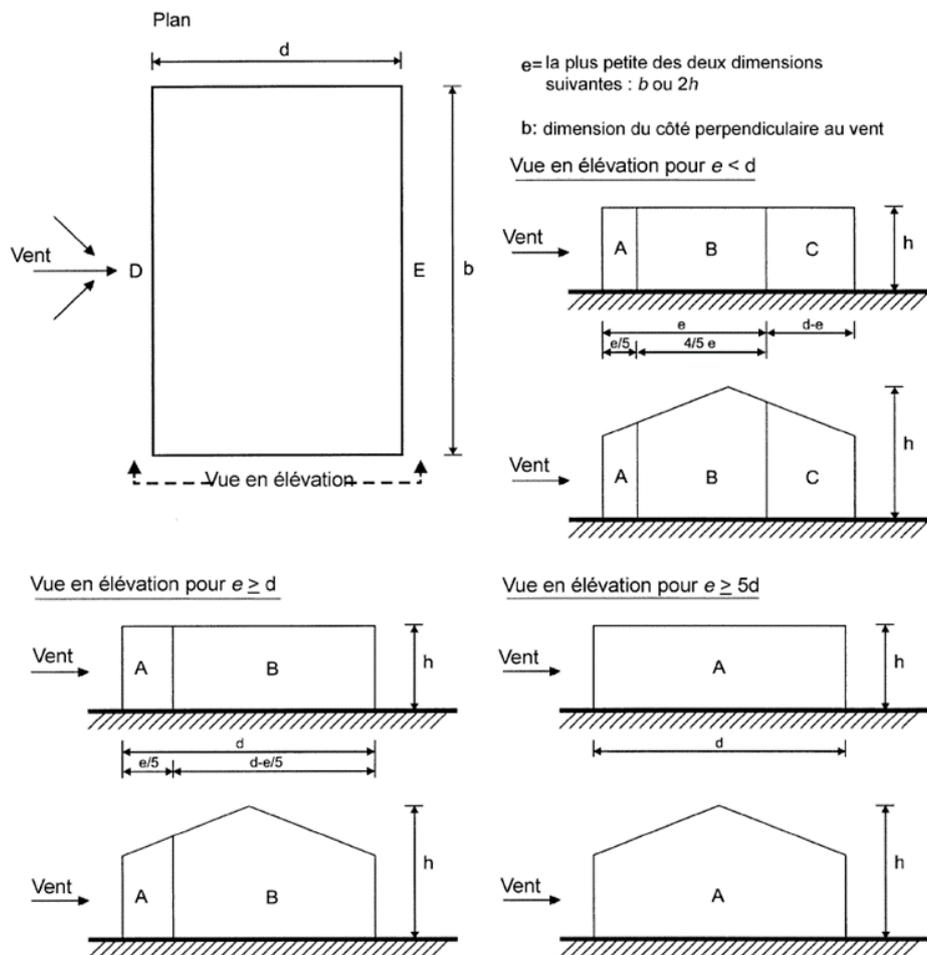


Figure 24 : Découpage des murs de façade en zones de pression, selon les proportions du bâtiment (extrait Eurocode 1-4)

Tableau 10. Valeurs recommandées des coefficients de pression extérieure pour les murs verticaux des bâtiments à plan rectangulaire (extrait de l'Eurocode 1-4)

Zone	A		B			C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$		$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
$h/d \geq 5$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1		-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
$1 \leq h/d < 5$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1		-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
$h/d \leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1		-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

L'Eurocode considère deux coefficients de pression :

- $c_{pe,1}$ est utilisé pour calculer la pression locale sur un élément d'aire inférieure à 1 m^2 (éléments de bardage, menuiseries, fixations...);
- $c_{pe,10}$ permet de calculer la pression sur un élément d'aire supérieure ou égale à 10 m^2 . Il peut être également utilisé pour calculer la force totale exercée par le vent sur la construction, en l'absence d'un coefficient de force.

Une procédure de calcul de c_{pe} est indiquée pour les éléments d'aire compris entre 1 et 10 m².

4.3.7.4. Coefficient structural $c_s c_d$

La force exercée par le vent F_w sur une construction est donnée par une expression telle que :

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

ou par sommation vectorielle sur les éléments de construction individuels par :

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{éléments}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

où

$c_s c_d$ est le coefficient structural,

c_f est le coefficient de force applicable à la construction ou aux éléments de construction,

A_{ref} l'aire de référence associée au coefficient de force.

La sommation vectorielle des forces agissant sur les éléments peut aussi être faite à partir des coefficients de pression c_{pe} et c_{pi} au lieu du coefficient de force c_f si ce dernier n'est pas connu.

Le coefficient structural $c_s c_d$ est destiné à tenir compte de deux effets sur les actions du vent :

- un effet réducteur de « dimensions » (l'indice S de c_s signifie « size ») due à l'absence de simultanéité des pointes de pression à la surface de la construction ($c_s \leq 1$). Cet effet réducteur est d'autant plus important que les dimensions de la construction sont grandes.
- un effet amplificateur « dynamique » ($c_d > 1$) dû à l'excitation résonante du mode fondamental de vibration de la construction, par la turbulence. Cet effet dynamique est négligeable pour les constructions de dimensions modestes car leurs plus basses fréquences propres sont trop élevées (très supérieures à 1 Hz) pour que la turbulence ait encore une énergie suffisante pour exciter ces modes propres à la résonance.

La force F_w modifiée par le coefficient structural est en fait une force fictive dont les effets en termes de sollicitations dans la structure de la construction sont équivalents aux effets du vent turbulent et des forces d'inertie générées par l'excitation du mode propres fondamental.

Le coefficient structural s'écrit :

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

où

z_s est la hauteur de référence ; par exemple $z_s = 0,6 h$ pour une construction verticale de hauteur h ,

I_v est l'intensité de turbulence,

k_p est le facteur de pointe, calculé ici en tenant compte de l'intensité d'excitation et de la fréquence propre du mode,

B^2 est le coefficient de réponse quasi statique traduisant l'imparfaite corrélation de la pression sur la surface de la construction,

R^2 est le coefficient de réponse résonante traduisant la résonance du mode de vibration engendrée par la turbulence.

Les deux effets, réducteur et amplificateur, sont imbriqués dans la formulation du coefficient structural. L'Eurocode indique comment les séparer, à titre informatif, sous forme de deux coefficients disjoints c_s et c_d . Cette possibilité éclaire la notation $c_s c_d$ du coefficient structural qui peut paraître curieuse.

Le calcul du terme B^2 fait appel à une modélisation de l'échelle de turbulence, représentant la dimension moyenne des rafales du vent naturel.

Le calcul du terme R^2 fait appel à une modélisation de la densité spectrale de la turbulence (répartition de l'énergie turbulente selon la fréquence) et des fonctions d'admittance aérodynamique horizontale et verticale, qui rendent compte de la corrélation spatiale de la turbulence pour la fréquence propre du mode considéré.

Le tableau F.2 en fin d'Eurocode propose des valeurs de l'amortissement structural (sous la forme du décrement logarithmique) et une formulation permettant de calculer l'amortissement aérodynamique complémentaire.

L'annexe D de l'Eurocode propose des estimations du coefficient structural, sous forme d'abaques, pour quelques constructions courantes (bâtiment en acier ou en béton, cheminée en acier ou en béton).

4.3.8. Détachement tourbillonnaire et instabilités aéroélastiques

4.3.8.1. Détachement tourbillonnaire

Le contenu de cette partie tient compte du retour d'expérience du CEA sur l'application de cette norme aux cheminées.

Pour rappel, le détachement tourbillonnaire est un phénomène dynamique résultant de l'action du vent sur les structures élancées telles que les cheminées. Il peut se produire pour une vitesse du vent inférieure à sa vitesse caractéristique.

Un paramètre caractéristique de l'écoulement de l'air autour d'un cylindre est le nombre de Reynolds qui est proportionnel à la vitesse de l'écoulement. En régime laminaire, c'est-à-dire lorsque la vitesse d'écoulement est très faible, l'écoulement est symétrique entre l'avant et l'arrière du cylindre. Lorsque la vitesse d'écoulement augmente, la couche limite arrière s'épaissit puis un décollement se forme en donnant naissance à deux tourbillons symétriques stationnaires dont le volume augmente lorsque la vitesse d'écoulement croît. Au-delà d'une certaine vitesse du vent dite critique, les tourbillons se détachent alternativement et périodiquement. Ces tourbillons sont emportés par le courant et il se forme alors deux files de tourbillons alternés. Ce phénomène a été mis en évidence par Bénard et Von Karman.

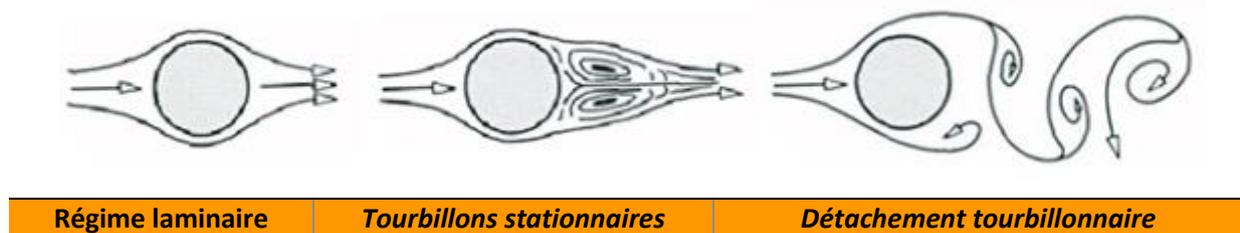


Figure 25 : Illustration du détachement tourbillonnaire

Lorsque la vitesse du vent atteint la vitesse critique, les lignes d'écoulement de l'air ne suivent donc plus le contour de la cheminée mais se détachent en certains points pour former des tourbillons. Ces derniers décollent alternativement de chaque côté de la cheminée en exerçant sur les surfaces latérales une pression alternée qui peut être suffisante pour produire des oscillations transversales significatives si la fréquence des tourbillons est proche de la fréquence propre du mode fondamental de vibration de la cheminée (phénomène de résonance). Lorsque ce phénomène se produit, la cheminée est soumise simultanément à des forces de dérive et de traînée.

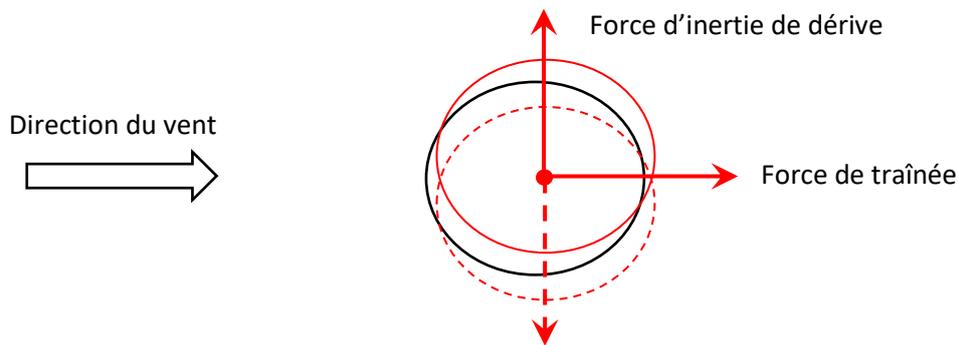


Figure 26 : Illustration des forces liées au vent s'exerçant sur une cheminée (vue en coupe)

La vitesse critique du vent $v_{crit,i}$ pour la fréquence $n_{i,y}$ du mode i de vibration d'une cheminée, par exemple, de diamètre b a pour expression :

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St}$$

Où St est le nombre de Strouhal⁴⁹ qui est égal à 0,18 dans le cas d'une section circulaire.

La mise en place d'ailettes hélicoïdales permet de décorrélérer spatialement le phénomène de détachement tourbillonnaire dans le sillage des corps cylindriques élancés et d'éviter les oscillations de grande amplitude.

On peut citer à ce sujet la thèse d'Oyvind Ellingsen soutenue en octobre 2021 (Vortex-induced vibrations on industrial chimneys [74]). Parmi les résultats de la thèse qui constitue un travail théorique et expérimental en soufflerie et in-situ, on peut signaler une observation : la turbulence atmosphérique de l'écoulement de vent incident exerce une influence sur le phénomène de VIV (vortex Induced Vibration). En situation de turbulence élevée, le VIV est similaire pour les cylindres lisses et rugueux alors que la réponse est accrue en situation de moindre turbulence.

Le détachement tourbillonnaire est traité dans l'annexe E de l'Eurocode 1-4 où deux méthodes 1 et 2 sont proposées pour évaluer ses effets. L'annexe nationale de l'Eurocode 1-4 précise qu'il convient de choisir la méthode 2 pour les constructions isolées en console telles que les cheminées et les mâts à section circulaire ou carrée et apporte des compléments pour son application ; la méthode 1 est utilisable dans les autres cas.

La méthode 2 permet de traiter spécifiquement les situations de forte stabilité atmosphérique associées à des vitesses de vent non négligeables.

Dans ces situations, des conditions d'écoulement stratifié peuvent se produire, avec une turbulence nulle ou quasi-nulle. De telles situations ont été observées dans les zones côtières de l'Europe septentrionale, où elles ont conduit à des endommagements graves de cheminées au comportement sans problème pendant 15 à 20 ans. Ces situations paraissent pouvoir se réaliser en France, bien que Météo-France n'ait pas été en mesure de le confirmer.

Il est à noter que ces situations où la turbulence mécanique générée par le frottement sur la rugosité du terrain, est abolie, ne peuvent pas subsister pour des vitesses dépassant 7 à 10 m/s ; elles ne sont donc à considérer que pour les constructions dont la vitesse critique de détachement tourbillonnaire reste inférieure à ces limites.

Dans la norme, il n'est pas nécessaire d'examiner l'effet du détachement tourbillonnaire lorsque la vitesse critique est supérieure à 1,25 fois la vitesse moyenne caractéristique du vent évaluée à la hauteur de la section où se produit le détachement tourbillonnaire.

⁴⁹ Le nombre de Strouhal est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante.

En présence de détachement tourbillonnaire, la cheminée est soumise à des forces d'inertie de dérive qui sont proportionnelles à la déformée de son mode fondamental de vibration. Il est recommandé d'effectuer une analyse modale pour déterminer cette déformée. En effet, les formules approchées données au paragraphe F3 de l'annexe informative F de l'Eurocode 1-4 peuvent sous-évaluer la déformée de ce mode et, par conséquent, les forces de dérive.

L'Eurocode 1-4 ne définit pas les forces de traînée concomitantes aux forces de dérive. Ces forces doivent être déterminées en appliquant la même méthode que celle utilisée en l'absence de détachement tourbillonnaire, mais en considérant que la vitesse moyenne du vent à la hauteur de référence est égale à la vitesse critique.

Les forces de dérive dues au détachement tourbillonnaire peuvent être significativement plus importantes que les forces de traînée et il est donc indispensable d'examiner la sensibilité des cheminées à ce phénomène qui peuvent induire une usure prématurée de la structure. L'Eurocode apporte des éléments complémentaires à ce sujet.

Les effets du détachement tourbillonnaire sont à étudier lorsque la vitesse critique du vent est inférieure ou égale à la vitesse moyenne du vent retenue pour la démonstration de sûreté (vitesse de vent moyenne WENRA $10^{-4}/\text{an}$).

4.3.8.2. Phénomène de galop

Le phénomène de galop est une vibration auto-entretenue d'une structure souple selon la direction perpendiculaire au vent. L'écoulement du vent modifié par le mouvement de la structure, amplifie le mouvement et conduit à une instabilité. Ce phénomène concerne notamment les structures ayant des sections transversales rectangulaires, en forme de I, de U ou de T.

La vitesse déclenchant le galop est la suivante :

$$v_{CG} = \frac{2 \cdot Sc}{a_G} \cdot n_{1,y} \cdot b$$

où Sc est le nombre de Scruton⁵⁰, $n_{1,y}$ la fréquence du mode perpendiculaire au vent, b la largeur de la structure, a_G un coefficient d'instabilité au galop qui est fonction de la section de la structure.

L'Eurocode 1-4 préconise de s'assurer que la vitesse du vent déclenchant le galop V_{CG} soit supérieure à 1,25 la vitesse moyenne du vent : $V_{CG} > 1,25 V_m$.

L'Eurocode donne le coefficient d'instabilité en galop pour diverses sections transversales, permettant de calculer la vitesse du vent de déclenchement du galop. Il convient de s'assurer que cette vitesse est supérieure à la vitesse moyenne du vent retenue pour la démonstration de sûreté (vitesse de vent moyenne WENRA $10^{-4}/\text{an}$).

4.4. Approches alternatives ou complémentaires à l'Eurocode pour l'étude des effets des vents sur les structures

Pour différentes étapes de l'approche Eurocode présentée dans la précédente partie, il peut être envisagé de mettre en œuvre des méthodes alternatives aux formules présentées dans l'Eurocode. Après avoir abordé le cas d'études disposant de mesures in-situ, les simulations numériques en mécanique des fluides, dites simulations CFD (pour Computational Fluid Dynamics) seront détaillées avant de présenter les simulations physiques, c'est-à-dire des simulations sur maquette à échelle réduite, en soufflerie à couche limite atmosphérique.

Cette partie a été rédigée par l'ONERA, le CSTB, J. Biétry et complétée par EDF et l'IRSN et l'entreprise Baudin Chateauf.

⁵⁰ Le nombre de Scruton traduit la vibration induite par le vent autour d'une structure

4.4.1. Simulation numérique CFD

Les simulations numériques CFD proposent une résolution des équations régissant les mouvements d'un fluide. Dans le cas présent, il s'agit de caractériser des écoulements externes de l'air dans la couche limite atmosphérique à différentes échelles⁵¹ :

- une échelle dite méso, pour la prise en compte des effets de relief et de rugosité,
- une échelle locale, permettant l'évaluation des effets de l'environnement proche sur le bâtiment à dimensionner.

Dans le premier cas, on parle généralement de « recalage climatique » (terme utilisé par le CSTB). L'objectif est de caractériser l'influence du relief et de la rugosité sur le vent au niveau du site d'intérêt. Ce type de simulation nécessite de considérer un domaine de calcul important, particulièrement pour les zones de reliefs complexes.

Dans le second cas, les simulations visent à modéliser la répartition des pressions directement obtenues sur le bâtiment à dimensionner en tenant compte notamment des bâtiments alentour. Elles prennent en compte le relief, la longueur de rugosité lié à l'occupation des sols et modélisent tous les paramètres physiques (vitesse, température, pression, énergie cinétique turbulente, dissipation...).

Ces 2 types d'application sont présentées plus en détail ci-après. Pour approfondir le sujet, le lecteur pourra se reporter à l'annexe K du draft du futur Eurocode [13] (bonnes pratiques sur les simulations).

Dans le cadre de l'approche Eurocode (soit en considérant une période de retour de 50 ans), les phénomènes dimensionnants correspondent, pour la métropole, à des événements de tempêtes de type synoptique. Pour la réalisation des simulations, cela signifie que la couche limite atmosphérique peut être modélisée avec une stabilité neutre, c'est-à-dire que les phénomènes thermiques deviennent négligeables devant la dynamique de la couche limite atmosphérique. Cette hypothèse/approximation est celle retenue pour l'ensemble des simulations présentées dans cette partie.

4.4.1.1. Cadre théorique général de la modélisation de la turbulence

Les équations de Navier-Stokes décrivent de manière générale le mouvement de fluides.

La simulation d'écoulements turbulents est possible en réalisant des Simulations Numériques Directes (SND ou DNS en anglais). Cette approche est intéressante car elle ne nécessite pas le développement de modèles spécifiques mais elle reste limitée à des applications à des nombres de Reynolds limités du fait de coûts de calcul rédhibitoires.

D'autres approches existent donc permettant de simuler les écoulements turbulents comme l'approche Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANS), Detached-Eddy Simulation (DES) ou l'approche Large-Eddy Simulation (LES). Les deux premières reposent sur l'introduction d'opérateurs de moyenne appliqués aux équations de Navier-Stokes et le développement de modèles physiques basés sur des expériences ou des simulations DNS. Le modèle large Eddy Simulation LES ne fait pas l'approximation des équations de Navier Stokes moyennées. Les deux paragraphes suivants donneront quelques informations sur ces approches, l'Annexe 10 décrivant un peu plus de détails.

Concernant l'approche RANS, elle repose sur la moyenne dite de Reynolds. En considérant une variable scalaire $u(x,t)$, par exemple, sa valeur moyenne est définie par :

⁵¹ Le vocabulaire présenté est celui utilisé par le GT. On peut rappeler de façon plus générale que la descente d'échelle permet de passer de l'échelle planétaire (terre, année, mois) vers l'échelle mésoéchelle (région, jour, heure) jusqu'à l'échelle locale (plusieurs kilomètres, heure, seconde). Les données de mésoéchelle servent de données d'entrée (conditions limites) à l'échelle locale. Elles proviennent souvent de réanalyses. La simulation CFD se situe à l'échelle locale. Les données mésoéchelles proviennent souvent de réanalyses composées de données de différents capteurs à une grande résolution. Pour obtenir une meilleure résolution, des descentes d'échelle sont faites à l'aide de calculs. Le modèle mésoéchelle va fournir les données météorologiques pour un site donné à une résolution de l'ordre de plusieurs kilomètres. La première donnée au-dessus du sol est souvent haute. Les bâtiments et le relief ne sont pas représentés physiquement dans le calcul. Dans l'échelle locale, les bâtiments sont représentés et les calculs se font à l'aide de la CFD qui résout les équations de Navier Stokes.

$$\langle u(x,t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^T u(x,t) dt \right)$$

Cet opérateur de moyenne commute avec les dérivées partielles spatiales ou temporelle et ses propriétés sont les suivantes :

$$\begin{cases} u(x,t) = \langle u(x,t) \rangle + u'(x,t) \\ \langle \langle u(x,t) \rangle \rangle = \langle u(x,t) \rangle \\ \langle u'(x,t) \rangle = 0 \end{cases}$$

Cet opérateur décompose la grandeur instantanée en une composante moyenne et une composante fluctuante. Son introduction dans les équations de Navier-Stokes définit un nouveau système d'équations connu comme les équations RANS dans lesquelles apparaissent de nouvelles inconnues de la forme $-\langle v_i' v_j' \rangle$, appelées tensions de Reynolds. Ces inconnues forment un tenseur d'ordre 2 et doivent être modélisées ou résolues pour pouvoir résoudre les équations. Elles sont exprimées à l'aide des grandeurs moyennes de l'écoulement supposées connues et d'une viscosité dynamique, la viscosité turbulente μ_t pour les modèles du premier ordre. Cette dernière grandeur s'obtient à partir de grandeurs turbulentes moyennes comme l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation turbulente ε , grandeurs elles-mêmes estimées à l'aide de leurs propres équations de transport. On parle ainsi de modèles de turbulence à équations de transport (par exemple le modèle de turbulence k- ε standard). L'opérateur de moyenne précédent est particulièrement adapté pour le traitement des écoulements stationnaires en moyenne pour un fluide incompressible. Dans le cas des écoulements compressibles, cet opérateur est toujours utilisable mais on emploie aussi l'opérateur de moyenne de Favre correspondant à une moyenne pondérée par la masse. Enfin, notons que l'approche URANS permet d'étendre l'approche RANS aux écoulements instationnaires (U signifie Unsteady). Son application est plutôt limitée à des écoulements de nature périodique comme le détachement tourbillonnaire ou allée de von Karmàn derrière un obstacle. Ces phénomènes physiques ne sont pas captés par les modèles RANS de premier ordre (modèle à viscosité turbulente).

L'approche LES ([67],[68]) repose sur l'utilisation d'opérateurs de moyenne spatiaux. De fait, on est amené à distinguer les échelles résolues en temps et en espace des échelles non résolues. Par rapport à l'approche RANS, elle ne conduit pas à l'introduction d'équations de transport supplémentaires. De plus, la modélisation porte uniquement sur les échelles non résolues, c'est à dire proche des parois alors que, dans l'approche RANS, la modélisation englobe toutes les échelles. L'approche LES est particulièrement adaptée à la simulation d'écoulements instationnaires, périodique ou pas, lorsque l'on cherche une description plutôt quantitative. Elle est aussi la seule approche qui donne directement les valeurs extrêmes sous réserve d'une taille de maillage suffisamment fine pour modéliser l'échelle de turbulence conduisant aux pressions de pointe.

4.4.1.2. Applications / pratiques actuelles

Comme décrit précédemment, les simulations CFD peuvent être utilisées pour deux types d'application dans le cadre de méthodes alternatives à l'Eurocode. Ces deux types d'application sont explicitées ci-dessous. Pour chacune, les descriptions fournies correspondent à l'état des pratiques actuelles/usuelles.

Le recalage climatique

Les simulations mésoéchelles, généralement appelées simulation de « recalage climatique » par le CSTB, sont des simulation CFD-RANS qui ont pour but de déterminer les conditions de vent nécessaires au dimensionnement. Elles permettent d'évaluer l'impact des effets de topographie et de rugosité environnant un site d'étude sans passer par les formules empiriques proposées par l'Eurocode.

Ces conditions peuvent ensuite s'appliquer soit dans le cadre d'un calcul Eurocode classique, soit en condition d'entrée pour une prise en compte des effets locaux par exemple en soufflerie. En effet, ce type de simulation permet d'obtenir au niveau du site et par direction de vent simulée, les profils de vitesse moyenne et de turbulence associée.

Ce type de simulation peut également servir à établir des coefficients de transferts entre un point de mesures météo et le site d'étude. L'usage de ces coefficients permet ensuite de transférer la série de données de vent sur le site pour la réalisation d'un traitement statistique aux valeurs extrêmes (cf. § 4.1).

Ainsi, cette simulation CFD-RANS peut être utilisée :

- soit pour corriger les données météorologiques obtenues dans une station dont l'environnement local (rugosité, orographie) s'écarte beaucoup des conditions de référence de l'Eurocode. Les vitesses moyennes mesurées sur le mât de la station peuvent être transposées à 10 m de hauteur dans un site fictif de référence, plat et de faible rugosité (rase campagne). Une analyse statistique aux valeurs extrêmes des données ainsi corrigées permet alors d'estimer la valeur de base de la vitesse de référence $v_{b,0}$, point d'entrée dans l'Eurocode.
- soit, partant de la vitesse de référence $v_{b,0}$ dans la région du site étudié (vitesse lue dans l'annexe nationale ou obtenue par une simulation CFD telle que décrite précédemment), de préciser pour chaque direction de vent, l'influence de la rugosité et de l'orographie du site étudié sur la vitesse moyenne $v_m(z)$ sur l'intensité de turbulence $I_v(z)$ et ainsi sur la pression dynamique de pointe $q_p(z)$. Ces quantités sont à déterminer aux points du site et aux hauteurs utiles à l'application de l'Eurocode (hauteurs z_e pour l'utilisation des coefficients de pression ou de force, z_s pour l'étude du coefficient structural).
- soit pour transposer directement les données météorologiques depuis la station vers le site, pour des applications particulières qui n'entrent pas dans le champ de l'Eurocode. Par définition, la vitesse de référence $v_{b,0}$ ne peut être estimée statistiquement que dans les conditions (rugosité, orographie) de référence fixées par l'Eurocode, et non dans les conditions du site.

Processus de mise en œuvre :

➤ *Le domaine de calcul et les données d'entrées :*

La première étape du processus consiste à déterminer la taille et l'emplacement du domaine d'étude, ainsi que ses propriétés de topographie et de rugosité. Ces deux éléments constituent les données principales et essentielles du calcul. La pertinence des résultats est donc directement liée à leur qualité.

Le domaine doit de toute évidence comprendre l'emplacement du site étudié et la (ou les) station(s) météorologique(s) impliquée(s). Le choix de la taille du domaine dépend ensuite de nombreux paramètres. De manière générale, il faut particulièrement tenir compte :

- des caractéristiques topographiques de l'environnement, notamment les effets de relief susceptibles d'impacter les points d'intérêt doivent être modélisés ;
- des spécificités de la rose des vents dans la région, notamment aux niveaux des directions dominantes des vents forts.

Dans tous les cas, la taille du domaine doit être suffisamment grande pour éviter tout effet de bord lors des simulations.

Les données topographiques permettent de réaliser un modèle 3D de la surface « sol » de la simulation et correspondant au relief du domaine de calcul. On utilise généralement un Modèle numérique de terrain (MNT), comme par exemple ceux proposés par l'IGN. Ces données doivent être suffisamment précises pour représenter l'ensemble des effets orographiques significatifs pouvant affecter les vents forts.

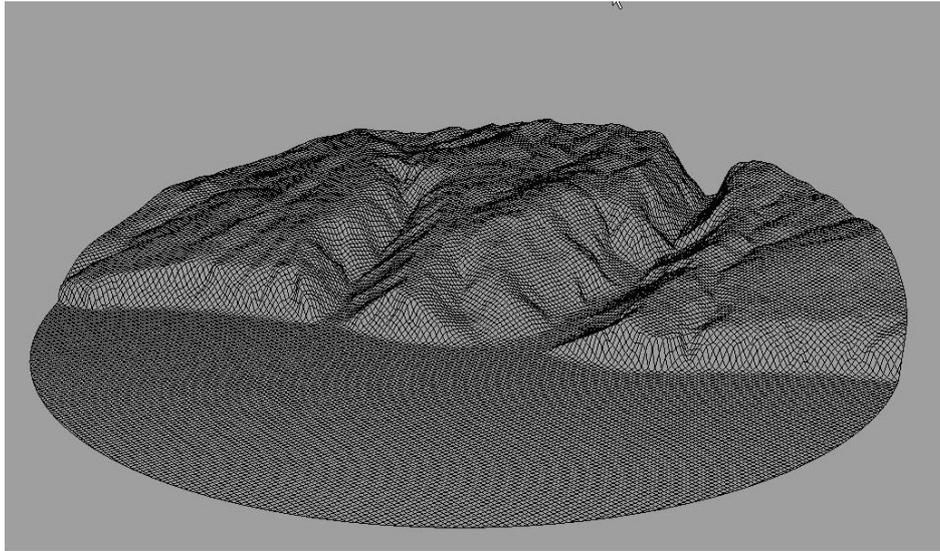


Figure 27 : Exemple de représentation d'un modèle numérique de terrain

Les données de rugosité permettent de définir spatialement les types d'occupation au sol pour le domaine d'étude. Il s'agit d'une « carte » de longueurs de rugosité traduisant les frottements générés par la végétation, les constructions, les lacs... Ces valeurs sont définies empiriquement et peuvent varier suivant la source d'information utilisée, voire suivant l'expérience personnelle de chaque spécialiste. Dans ce contexte, les valeurs et exemples proposés dans l'annexe nationale de l'Eurocode vent servent de référence.

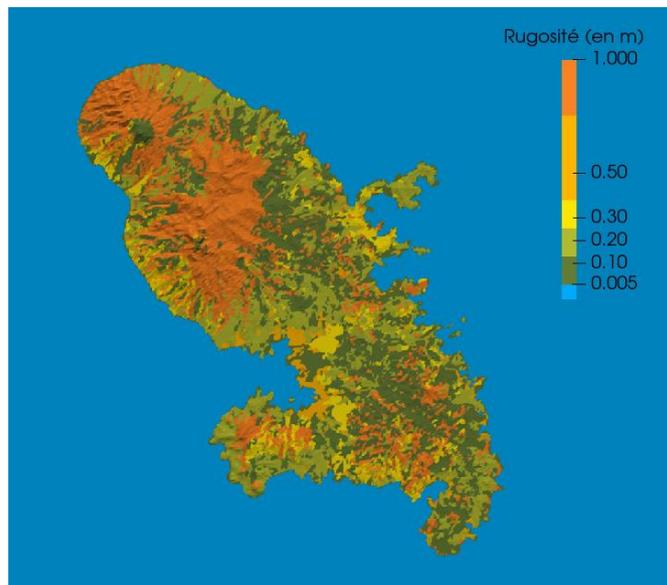


Figure 28 : Exemple de représentation d'une carte de rugosité (valeurs de z_0)

➤ **Le maillage :**

A partir de la surface obtenue avec le MNT, une « boîte de calcul » est mise en place. La hauteur de cette boîte doit être suffisamment importante pour tenir compte des éventuels dénivelés abrupts du relief. Elle peut contenir une zone tampon (plate et de rugosité II) qui permet d'introduire ou d'estimer le vent de référence. Globalement, les dimensions de la boîte de calcul doivent être assez conséquentes pour éviter tout phénomène de blocage. Cette boîte constitue le domaine 3D au sein duquel seront résolues les équations de la mécanique des fluides.

L'étape de maillage consiste à réaliser une discrétisation de l'ensemble du domaine de calcul par petits éléments volumiques, appelés cellules ou mailles. Pour limiter les coûts de calcul, ce maillage est généralement réalisé de

manière concentrique à partir des zones d'intérêt. Sa précision est alors la plus fine pour s'étirer ensuite progressivement à mesure que la distance croît. Pour une bonne modélisation des effets de rugosité, la couche limite au sol doit être simulée avec certains critères [15] impératifs.

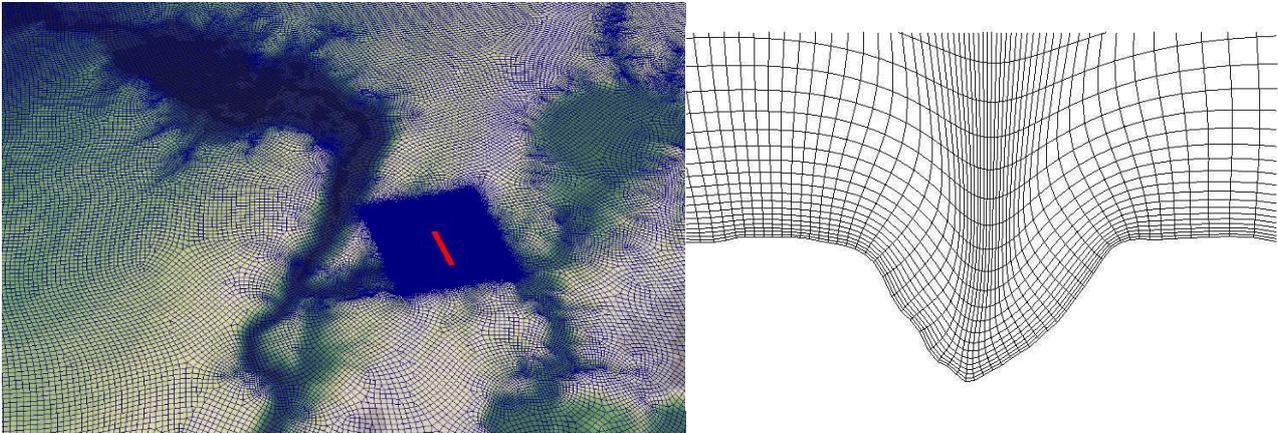


Figure 29 : Exemple de maillage surfacique (à gauche) à proximité de la zone d'intérêt (ligne rouge) et d'un plan de coupe verticale avec couche limite (à droite)

➤ *Les simulations :*

Les simulations sont réalisées en régime stationnaire pour un fluide incompressible et l'écoulement modélisé correspond à une atmosphère à stabilité neutre.

La prise en compte des phénomènes turbulents considérée à travers une approche RANS est suffisante pour ce type de modélisation. Généralement, le modèle retenu est issu d'un modèle k-ε standard adapté aux calculs de modélisation atmosphérique (cf. [69]). Ce modèle pourrait ne pas être suffisant en cas de terrains complexes.

Classiquement, la condition d'entrée du vent en amont du domaine de calcul est imposée comme homogène avec une variation verticale aussi bien pour la vitesse que pour la turbulence. En accord avec l'Eurocode, le profil du vent moyen est logarithmique dans la couche de surface et suit la loi :

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ où } \kappa \text{ est la constante de Von Karman et } z_0 \text{ la longueur de rugosité d'entrée.}$$

L'énergie cinétique turbulente d'entrée k est donnée par : $k = \frac{U_*^2}{C_\mu}$, et son taux de dissipation ε par : $\varepsilon(z) = \frac{U_*^3}{\kappa \cdot z}$.

La vitesse de frottement U* est alors choisie en fonction de la vitesse de référence voulue pour l'étude de cas et la valeur du paramètre C_μ est directement liée au modèle de turbulence utilisé.

En ce qui concerne la surface représentant la topographie, elle correspond à une paroi ayant pour rugosité la cartographie établie par les données d'entrée. Les conditions des autres limites du domaine sont : soit des conditions de symétrie, soit des conditions de pression libre (en sortie de domaine).

A minima, les simulations sont réalisées pour 18 directions de vent, soit au moins tous les 20°.

➤ *Les résultats :*

Chacune des simulations réalisées permet de connaître en tout point du domaine de calcul le champ de vent résultant, aussi bien en vitesse, en direction qu'en intensité turbulente. Le post-traitement de ces simulations consiste alors à extraire les données obtenues au niveau de l'emplacement des zones d'intérêt (site d'étude et/ou mâts météo) pour chaque direction.

Dans le cas où le résultat recherché est le profil de vent au niveau du site en considérant une vitesse de référence (fixée par l'annexe nationale par exemple), il s'agit alors d'une sortie immédiate du calcul.

Dans le cas où la finalité est le calcul d'une vitesse locale, des coefficients de transferts entre la mesure météo et le site doivent être calculés en comparant les vitesses résultantes direction par direction.

A titre d'illustration, l'image ci-après représente le tracé de lignes de courant traversant une zone, obtenues par simulation numérique de type recalage climatique.

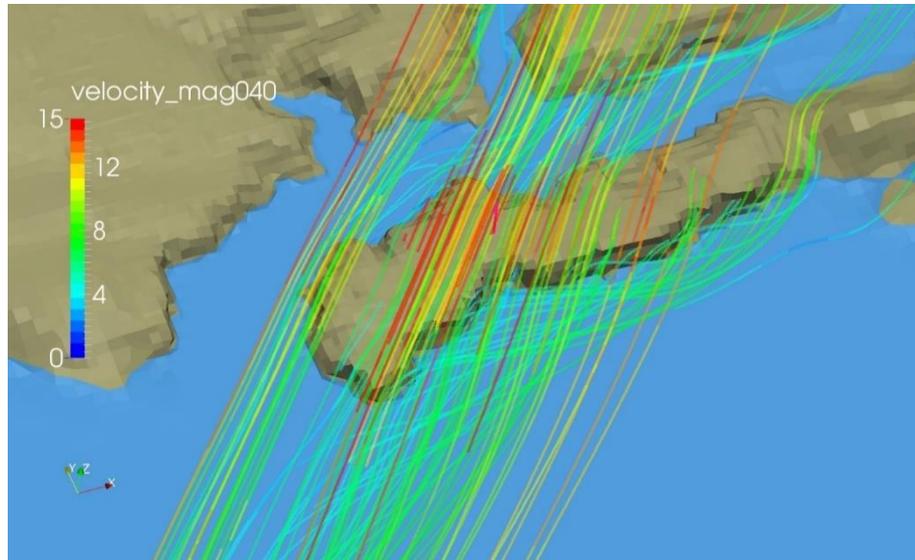


Figure 30 : Exemple de lignes de courant obtenues par recalage climatique

NB : Pour accéder à l'intensité de turbulence I à partir de simulation RANS, cette dernière se calcule à partir de l'énergie cinétique turbulente k et de la vitesse moyenne U , à partir de la formule :

$$I = \frac{\sqrt{2k/3}}{U}$$

La vitesse de pointe U_p au sens Eurocode peut ensuite se déduire de la formule :

$$U_p = \sqrt{1 + 7 * I} * U$$

La procédure de simulation décrite ici est éprouvée, utilisée pour de nombreuses études de recalage climatique et dont la pertinence a été évaluée par confrontation avec une approche expérimentale [70].

La caractérisation des effets locaux autour du bâtiment ou des bâtiments

Il peut être également intéressant de recourir à des simulations numériques pour la caractérisation des effets locaux de l'environnement proche. Par environnement proche, on entend ici un domaine limité à quelques centaines de mètres autour du bâtiment ou groupe de bâtiments d'étude.

Dans ce cas, l'ensemble des « obstacles » significatifs doivent être inclus dans le modèle 3D des simulations. Il peut s'agir aussi bien d'éléments de topographie que de végétations ou de constructions.

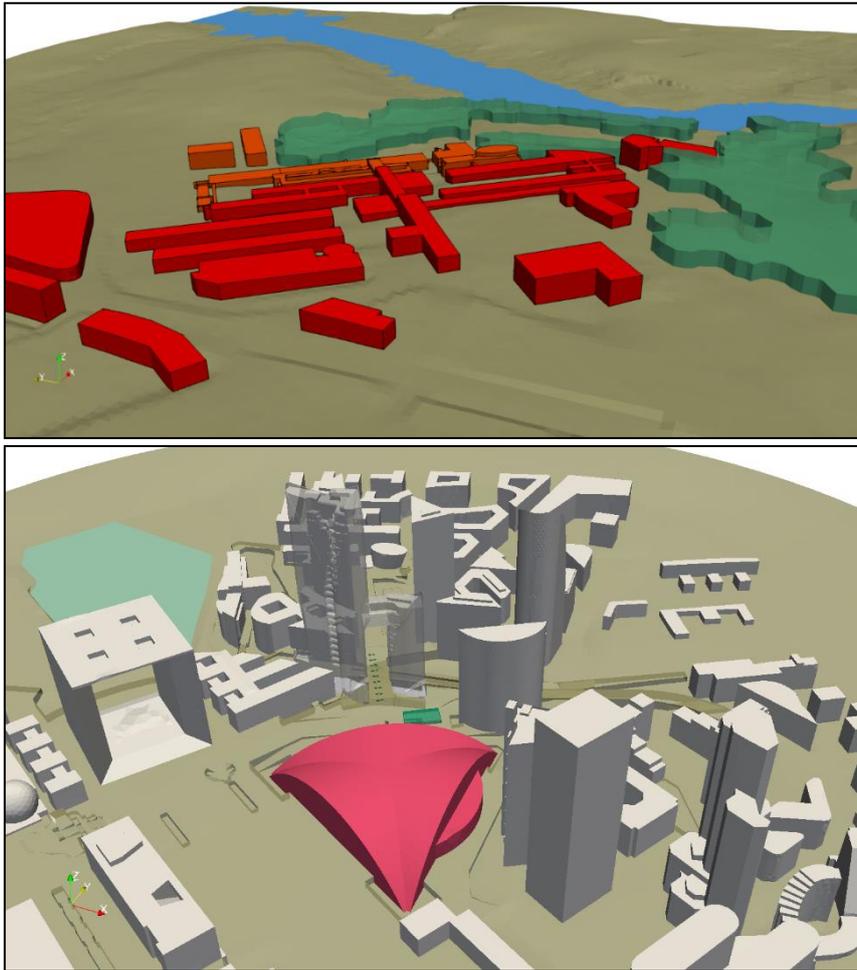


Figure 31 : Exemples de modèles 3D intégrant les « obstacles » significatifs autour d'un bâtiment étudié

Ce type d'étude à échelle de l'ouvrage et de son environnement proche permet d'affiner les vitesses de vent au droit des structures d'intérêt, en tenant compte des effets locaux du relief et des structures voisines. Le vent de référence est entré aux limites du modèle et la simulation des écoulements atteints en régime permanent permet de caractériser les effets de ralentissement ou d'accélération et obtenir une vitesse plus réaliste au droit des points d'intérêt.

Dans le cadre du dimensionnement au vent, ce type de modélisation reste néanmoins encore limité. En effet, cela nécessite de recourir à des simulations de type instationnaires permettant d'accéder aux caractéristiques spectrales du vent turbulent dans la couche limite atmosphérique. Ce type de simulation (accessible par exemple via les méthodes LES), bien qu'en constant développement, sont largement plus coûteuses en temps et moyens de calcul et pas toujours suffisamment maîtrisées.

Notons tout de même que la modélisation numérique peut être ici tout à fait pertinente (même en démarche RANS) en complément d'une approche expérimentale en fournissant :

- un diagnostic de prédimensionnement qui permet notamment d'effectuer un positionnement des capteurs de mesure plus fiable (cf. 4.4.2) ;
- une visualisation des écoulements pour mieux comprendre les résultats et phénomènes mis en jeux.

Apport des modèles développés dans le cadre de la dispersion atmosphérique

La suite de cette partie présente les perspectives apportées par l'utilisation de modèles développés sur les sites nucléaires dans le cadre d'études sur la dispersion atmosphérique ou sur les systèmes de ventilation.

De nombreux sites nucléaires disposent de modèles atmosphériques développés dans le cadre d'étude de dispersion atmosphérique. Le guide [75] coordonné par l'INERIS présente des bonnes pratiques pour l'étude de la dispersion atmosphérique pour l'industrie non nucléaire.

Des simulations numériques des effets du vent ont également pu être menées en lien avec les systèmes de ventilation. On peut citer par exemple la publication IRSN [76], les études sur ces problématiques sont présentées plus en détail en partie 4.7 du rapport.

Plus récemment, en 2020, une étude menée par EDF à l'échelle d'un site nucléaire en considérant l'objectif de caractérisation des effets des vents violents a fait l'objet d'une communication [77]. Les étapes de l'étude sont détaillées en Annexe 11.

Les modèles utilisés pour la dispersion atmosphérique ont d'autres objectifs que le dimensionnement au vent et ne visent donc pas à caractériser des valeurs de pression de pointe qui sont déterminantes pour le dimensionnement au vent. Accéder à des valeurs s'approchant des valeurs de pointe via la modélisation CFD de type LES nécessiterait de raffiner significativement les maillages au niveau des bâtiments.

Les modèles de dispersion utilisés à EDF ont permis de faire des jumeaux numériques pour certaines centrales nucléaires françaises avec l'outil CFD : Code-Saturne. Ces modèles de dispersion atmosphérique permettent de mesurer les valeurs de coefficient de transfert atmosphérique sur le site et à l'extérieur des sites. Les mesures recherchées sont souvent en altitude ou au niveau du sol et en dehors du domaine. Les simulations numériques faites pour les vents extrêmes demandent un maillage fin aux abords des bâtiments au sol et sur toute la hauteur de bâtiments (de l'ordre du mètre) alors que les simulations numériques pour la dispersion atmosphérique n'ont pas besoin de maillage fin près des bâtiments ni surtout sur leur hauteur. Ainsi, le raffinement des maillages ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agit d'une étude de dispersion ou de l'étude de l'effet du vent sur une structure. Les codes utilisés peuvent eux être les mêmes. L'outil utilisé Code Saturne permet de choisir entre les différents modèles existants : RANS avec des modèles de turbulence du premier ordre (ex : k- ϵ), RANS amélioré avec modèles du second ordre (comme le Rij SSG⁵²) ou LES. De nombreux travaux ont été réalisés avec l'approche LES dans de nombreux domaines avec l'outil Code-Saturne (thèse en 2012 [78] et références [79][80][81][82] pour les plus récents).

Conclusion

Concernant l'utilisation de simulations CFD pour l'étude des effets des vent forts sur la tenue des structures, on peut retenir une utilisation opérationnelle à l'échelle des environs d'un site nucléaire et des développements dont la robustesse est à consolider pour les approches à l'échelle locale du bâtiment.

En effet, les méthodes actuelles utilisées reposent en général sur des approches moyennées de la turbulence. Ces approches sont adaptées pour la prise en compte des effets de reliefs et de rugosité (à l'échelle des environs d'un site) mais pas pour simuler la turbulence des échelles spatiales fines. La démarche actuelle consiste alors à revenir généralement à des approximations pour établir la valeur extrême issus par exemple de l'Eurocode et le gain en précision apporté par la simulation par rapport à l'Eurocode devient alors difficile à évaluer. Dans ce contexte, le développement d'approches de simulation plus fines (Large-Eddy Simulation), semble une voie de recherche prometteuse pour mieux caractériser les effets locaux du vent autour des bâtiments.

⁵² Ce modèle résout les tensions de Reynolds et permet de calculer des recirculations que les modèles du premier ordre ne modélisent pas.

4.4.2. Simulation physique à échelle réduite

Pour affiner l'évaluation des vitesses de vent au droit des constructions d'intérêt et surtout pour estimer les actions extrêmes du vent (pressions sur les parois, sollicitations dans les structures, réponse dynamique, instabilités aéroélastiques éventuelles), la pratique de référence reste encore aujourd'hui l'approche par simulation physique à échelle réduite en soufflerie à couche limite atmosphérique. Cette méthode est utilisée pour le dimensionnement au vent des ouvrages (comme les stades, les IGH, les grands ponts...) dont les formes et les caractéristiques dynamiques sortent du cadre des bâtiments classiques référencés dans l'Eurocode (comme la maison individuelle, le petit collectif, la halle industrielle, le bâtiment avec toiture en voute cylindrique...). L'approche en soufflerie peut également s'avérer utile dans le cas d'environnements proches complexes présentant un risque accru.

La réalisation de ce type d'essais a pour but de déterminer les différentes charges de vent s'appliquant sur l'ouvrage testé. Il nécessite que les conditions de référence du vent soient préalablement établies.

4.4.2.1. Généralités

L'objectif de la simulation physique à échelle réduite décrite ici est de quantifier les efforts aérodynamiques exercés par le vent sur les structures. Les charges évaluées peuvent être autant locales que semi-globales ou globales suivant l'élément à dimensionner. Les contributions statiques et dynamiques sont considérées.

Les essais sont réalisés dans des souffleries dite à couche limite atmosphérique, c'est-à-dire des souffleries capables de simuler les caractéristiques du vent dans les basses couches de l'atmosphère : à savoir les gradients représentatifs de la vitesse et de la turbulence moyennes, mais également les échelles de longueur significatives et les corrélations spatio-temporelles. Les propriétés de l'écoulement doivent satisfaire les conditions de référence préétablies.

Principes de la simulation physique

Les écoulements en soufflerie et en vraie grandeur sont régis par les mêmes équations de Navier-Stokes rappelées en Annexe 10. Mais les « échelles » de vitesse, de longueur... sont différentes. Dans ce qui suit, nous appellerons « grandeurs de référence » ces « échelles » présentées en Annexe 10, en réservant l'acception habituelle de rapport entre une « grandeur de référence » (la hauteur du bâtiment par exemple, ou le diamètre d'une cheminée) en soufflerie et la même grandeur de référence en vraie grandeur.

En choisissant une longueur de référence L_R et une vitesse de référence V_R (par exemple la vitesse moyenne du vent à la hauteur du sommet de la construction), on définit de fait un temps de référence $t_R = \frac{L_R}{V_R}$ et une pression de référence $p_R = \rho V_R^2$.

NOTE : la masse volumique de l'air ρ est supposée identique en vraie grandeur et en soufflerie.

L'échelle géométrique ou « échelle de longueur » (ou échelle de la maquette, par exemple 1/250) est le rapport $L_* = \frac{L_{R,S}}{L_{R,VG}}$ où les indices S et VG désignent les conditions « soufflerie » et « vraie grandeur » respectivement. Il

existe aussi une « échelle des vitesses » $V_* = \frac{V_{R,S}}{V_{R,VG}}$ qui dépend des performances de la soufflerie et de

l'événement météorologique considéré. Ces deux échelles étant fixées, l'échelle des temps (et son inverse qui est l'échelle des fréquences) est également fixée $T_* = \frac{L_*}{V_*}$. Avec cette échelle, on pourra déterminer par exemple

la durée de la séquence de mesures en soufflerie représentative d'une heure en vraie grandeur. L'échelle des

fréquences intervient dans les études dynamiques faisant intervenir les fréquences propres de la construction étudiée.

Avec ces grandeurs de référence, on peut définir des variables réduites, repérées par le signe « ~ » en reprenant la convention adoptée dans l'Annexe 10 $\tilde{v} = \frac{v}{V_R}$; $\tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho_R}$ etc. On peut de même « adimensionner » les opérateurs de dérivation en espace et en temps qui interviennent dans l'équation de Navier-Stokes ; par exemple $\tilde{\nabla} = L_R \nabla$.

Avant de poursuivre cette opération, on explicitera la « force massique » f considérée au second membre de l'équation de Navier-Stokes présentée à l'Annexe 10 : il s'agit de la force de pesanteur caractérisée par l'accélération g .

Comme dans l'Annexe 10, l'équation de Navier Stokes peut être écrite sans dimension

$$\tilde{v} \cdot \tilde{\nabla}_{\tilde{x}} - \frac{1}{Re} \tilde{\Delta} \tilde{v} + \tilde{\nabla}_{\tilde{x}} \tilde{\rho} = \frac{1}{Fr} \tilde{f}$$

mais deux expressions (sans dimension) sont apparues :

- le nombre de Reynolds $Re = \frac{L_R V_R}{\nu}$ qui représente le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité,
- le nombre de Froude $Fr = \frac{V_R^2}{L_R g}$ qui représente le rapport des forces d'inertie aux forces de gravité.

Conditions de similitude

Pour qu'il y ait similitude des phénomènes en vraie grandeur et en soufflerie, il faut que l'équation réduite ci-dessus, qui les décrit quantitativement, soit identique terme à terme dans les deux cas. Il faut donc que les nombres de Froude et de Reynolds soient identiques dans les deux cas, à moins qu'on puisse montrer qu'ils correspondent, dans l'équation ci-dessus, à des termes négligeables dans les deux cas.

La satisfaction de toutes les conditions de similitude requise n'est en général pas possible à l'échelle du laboratoire. Il faut, suivant le phénomène à simuler, déterminer quels sont les critères principaux à reproduire.

Similitude de Reynolds

La similitude théorique demande l'égalité des nombres de Reynolds en soufflerie et en vraie grandeur $Re_S = Re_{VG}$. Or le fluide est le même dans les deux cas (air dans les conditions sensiblement « normales ») et donc la viscosité cinématique ν est la même en soufflerie et en vraie grandeur. Les échelles devraient donc respecter la relation $L_* V_* = 1$. Dans quelques rares cas, il est possible de respecter cette relation ; par exemple pour l'étude de la traînée d'un hauban de pont sur un échantillon de taille réelle, ou encore en augmentant la vitesse en soufflerie (mais sans dépasser 80 m/s au-delà de laquelle la compressibilité de l'air ne peut plus être négligée). En pratique, l'échelle de maquette est de l'ordre de 1/100 ou moins, et la similitude de Reynolds ne peut pas être respectée.

Fort heureusement, les constructions ont généralement des formes à arêtes vives : les points de décollement des sillages sont fixés par ces arêtes et le non-respect de la condition de Reynolds n'a pas d'importance, en général. Sur les formes arrondies (maquettes topographiques, fusées en attente de lancement, cheminées, bâtiments à section circulaire, dômes etc.), le sillage et donc les forces aérodynamiques sont dépendantes du nombre de Reynolds. Des artifices sont utilisés en soufflerie. Ils consistent à augmenter artificiellement la rugosité de surface de la maquette (fils de transition, sablage...).

Similitude de Froude

La condition de similitude de Froude intervient lorsque les forces de gravité jouent un rôle. C'est le cas lors d'études de panache de cheminée ou de rejets d'effluents chauds où la « poussée d'Archimède » n'est plus négligeable. C'est aussi le cas lors d'études des effets du vent sur des maquettes aéroélastiques⁵³ de ponts suspendus, où la tension dans les câbles porteurs résulte de la gravité.

Dans ce cas, l'égalité des nombres de Froude $\left(\frac{V_R^2}{gL_R}\right)_S = \left(\frac{V_R^2}{gL_R}\right)_{VG}$ impose la relation suivante entre les échelles

de vitesse et de longueur, l'accélération de la pesanteur g étant identique dans les deux situations :

$$\frac{V_*^2}{L_*} = 1 \quad \text{soit} \quad V_* = \sqrt{L_*}$$

En obligeant à « travailler » dans des écoulements de faible vitesse en soufflerie (quelques m/s), le respect de la similitude de Reynolds est encore plus problématique.

Simulation du vent turbulent

Pour l'étude des charges sur les structures, on s'intéresse aux vents forts d'origine dépressionnaire. La stabilité atmosphérique lorsque soufflent ces vents, est « neutre » ce qui signifie que les phénomènes thermiques deviennent négligeables devant la dynamique de la couche limite atmosphérique. Les souffleries « à couche limite » visent à bien reproduire les caractéristiques de la couche limite atmosphérique, c'est-à-dire le profil vertical de vitesse moyenne et les caractéristiques de la turbulence (intensités, échelles et spectre). Le domaine des phénomènes convectifs (orages, rafales convectives...) reste à explorer davantage.

Profil vertical de vitesse moyenne : le gradient vertical de vitesse moyenne à reproduire en soufflerie, à l'échelle géométrique retenue, est décrit dans l'Eurocode en fonction de la rugosité du site dans la direction d'où vient le vent.

Turbulence : l'intensité de turbulence et sa distribution avec la hauteur au-dessus du sol, sont également décrites dans l'Eurocode, ainsi que « l'échelle de turbulence » qui représente la dimension moyenne des rafales du vent naturel (cf. annexe B.1 de l'Eurocode). En pratique on admet des distorsions du simple au double maximum de cette échelle. L'annexe B.1 de l'Eurocode précise également la distribution spectrale (en fonction de la fréquence n) de la turbulence, utilisée dans les calculs dynamiques du « coefficient structural » $c_s c_d$. Pour l'étude de certaines constructions dominées par les problèmes dynamiques, par exemple les grands ponts à câbles, on est amené à étudier et définir une modélisation plus fine de la turbulence.

Les souffleries « à couche limite » sont caractérisées par une veine longue à l'amont de la zone d'essai dans laquelle on peut déployer (ou non) des obstacles, des générateurs de tourbillons, des rugosités, etc. qui ralentissent le vent à proximité du sol et génère des tourbillons de différentes tailles. La hauteur de la veine est continûment réglable pour éviter les effets de blocage. Les moyens employés pour modeler le flux incident sont du domaine de l'expérience propre au laboratoire ; l'essentiel est d'obtenir les caractéristiques de simulation visées, à l'échelle géométrique souhaitée. Actuellement, ce type de soufflerie permet de couvrir une gamme d'échelle géométrique allant de 1/50 à 1/500.

Similitude maquette

En général, la maquette de la construction étudiée est une maquette rigide équipée de nombreuses prises de pression. Chaque fois que possible, on reproduit également en soufflerie l'environnement proche en particulier les constructions voisines.

⁵³ Il s'agit de maquettes permettant d'évaluer le comportement aéroélastique de structures.

On est amené parfois à mettre en œuvre des maquettes « aéroélastiques » dynamiquement semblables à la construction étudiée (cas de grands ouvrages élancés et souples dont les modes propres ont des fréquences propres basses). Dans ce cas, on doit aussi respecter des conditions de similitude dynamique :

- l'échelle des fréquences (inverse de l'échelle des temps) fixe les fréquences propres que devra avoir la maquette ;
- l'échelle des masses est également fixée : $M_* = L_*^3$ et la construction de la maquette devra en tenir compte ;
- l'amortissement des modes propres doit être le même en vraie grandeur et en soufflerie.

Mesure des pressions en soufflerie

Différents systèmes de mesure sont utilisés en soufflerie pour connaître les vitesses instantanées (anémométrie à fils chauds), les accélérations et les déplacements de maquette aéroélastique, les forces et moments aérodynamiques (« balances » dynamométriques). Mais les progrès les plus importants concernent les systèmes de mesure des pressions aérodynamiques, autorisant de nouvelles approches de traitement des données. La miniaturisation des capteurs de pression et les progrès des systèmes d'acquisition de données permettent par exemple d'équiper une maquette pour la mesure simultanée de 1 000 pressions à la fréquence de 1 000 mesures par seconde et par voie (1 million de mesures par seconde). Ces mesures de pression instantanée sont enregistrées informatiquement, une séquence de 40 secondes en soufflerie correspondant à environ 2 heures en vraie grandeur (pour une échelle de temps supposée égale à 1/180).

Chacune des voies (prise de pression) peut ensuite être analysée a posteriori, en particulier pour l'étude de leurs valeurs extrêmes (actions locales sur les éléments de parois).

Ces pressions $p_k(t)$ à l'instant t agissant sur une petite aire A_k peuvent également être combinées pour reconstituer, par exemple la force aérodynamique totale sur la paroi où sont situées ces prises de pression $F(t) = \sum_k A_k \cdot p_k(t)$. Mieux encore, en précalculant par exemple le coefficient d'influence λ_{jk} pour une sollicitation S_j d'une force unitaire appliquée au point k , on peut reconstituer cette sollicitation (ou toute autre grandeur fonction des champs de pression instantanée mesurés) $S_j(t) = \sum_k \lambda_{jk} A_k p_k(t)$ puis en faire une analyse statistique.

La base de données constituée des nombreuses mesures instantanées et synchrones de pression est ainsi réutilisable pour différents usages, y compris pour l'étude de la réponse dynamique de la structure sur ses premiers modes propres de vibration. Il suffit de remplacer le coefficient λ_{jk} ci-dessus par la déformée modale μ_{jk} du mode j , ou plutôt la composante normale à l'élément de paroi k de la déformée modale. On obtient alors la force généralisée $Q_j(t)$ du mode considéré. Ce procédé n'est cependant utilisable qu'à condition de pouvoir supposer négligeables les forces aéroélastiques ; dans le cas contraire, une étude sur maquette aéroélastique est nécessaire.

Classiquement, pour ces essais, des maquettes à l'échelle voulue sont réalisées, aussi bien pour l'environnement que pour l'ouvrage à dimensionner. La figure ci-dessous montre un exemple d'étude réalisée dans la soufflerie NSA⁵⁴ du CSTB.

⁵⁴ La soufflerie NSA est une soufflerie moderne à retour, qui dispose d'une veine principale de 20 mètres de long, de 4 mètres de large et d'une hauteur réglable entre 2 et 3 mètres. Il est possible d'ajuster la vitesse de l'écoulement de l'air de 0 à 30 m/s, à +/- 0,1 m/s. La température est maintenue stable au cours des études. La soufflerie NSA est l'installation dédiée à l'étude des grands ouvrages de génie civil (tours, stades, bâtiments) et des grands ponts, à des échelles du 1/50e au 1/500e.



Figure 32 : Exemple d'essai en soufflerie NSA au CSTB

Le bâtiment « cible » est équipée en conséquence. Habituellement, 2 types de mesures sont réalisées :

- des mesures de pressions ponctuelles via des capteurs,
- des mesures de charges, via une « balance ».

Les essais sont généralement mis en œuvre pour 36 directions de vent (une direction tous les 10°)

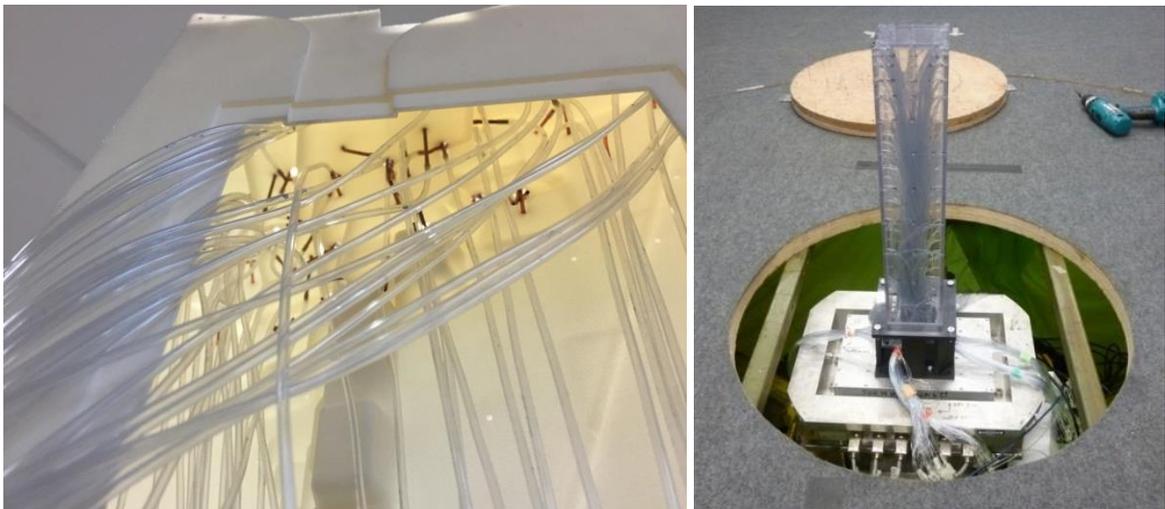


Figure 33 : Exemple de maquette équipée en capteurs et balance

Les fréquences d'acquisition des mesures doivent être a minima représentatives des valeurs de pointe recherchée à l'échelle utilisée. De plus, pour une identification pertinente des cas de charges, il est primordial de réaliser les mesures de pression de manière synchrone.

L'usage veut que pour chaque direction, le temps d'acquisition soit au moins égale à 2 heures vraie grandeur.

4.4.2.2. Applications / pratiques actuelles

Les cas pour lesquels des études en soufflerie sont réalisés sont généralement des ouvrages de forme particulières pour lesquels les préconisations de l'Eurocode ne sont pas adaptées. Les essais en soufflerie permettent également d'évaluer l'influence d'ouvrages alentours pouvant provoquer des effets locaux.

Le cas des essais menés pour déterminer les actions du vent sur la voile solaire de l'auditorium de la Seine Musicale à Boulogne Billancourt est un cas typique où les essais en soufflerie sont utiles compte tenu de la forme de l'ouvrage, de son taux de remplissage et de son implantation. Dans ce cas précis, l'entreprise Baudin Chateaufort a mené les calculs de dimensionnement de la voile a eu accès à trois séries d'essais menées par le CSTB à partir de 3 maquettes :

- une maquette au 1/500^e pour prendre en compte des effets globaux liés à l'environnement du site,
- une maquette au 1/250^e avec un zoom sur l'ouvrage complet de la Seine Musicale pour les effets du vent sur l'œuf notamment,
- une maquette au 1/75^e focus sur la Voile Solaire.

Des rugosités de surface ont été ajoutées sur les parties courbées de la maquette pour être plus représentatif des conditions de Reynolds que l'on veut reproduire.

Deux types de mesures ont été réalisés : des balances dynamométriques pour chaque demi-voile et des prises de pressions de part en part de panneaux solaires de la voile. Les voiles étant mobiles, 5 positions de la voile ont été prises en compte. Pour chacune, des mesures ont été menées par secteur de 20 degrés sur la direction du vent. Du fait de la forme de la structure, un modèle de transfert (barres fictives) a été élaboré pour répercuter les cas de charge dans le modèle de dimensionnement de la structure. Il est à noter que les résultats obtenus ont été majorés forfaitairement d'un facteur 1,5 (ce coefficient, distinct du coefficient partiel de l'Eurocode, permet de majorer les résultats issus des sondes de pressions afin de converger vers les résultats des balances dynamométriques). Il est issu de discussions entre le bureau d'étude de conception, le bureau de contrôle et le CSTB). La majoration a été appliquée sur 3 directions en tenant compte des coefficients d'amplification dynamique (eux même différents selon les 3 directions) : avec 146 configurations, 302 panneaux et 3 composants par panneau, 132 000 charges ponctuelles transférées ont été évaluées. Pour le dimensionnement de la structure métallique, les actions variables, y compris celles dues aux effets du vent, sont ensuite combinées selon les principes de l'EN1990.

Les mesures de balance dynamométriques ont servi à évaluer, par l'intermédiaire du modèle de transfert, la descente de charge en pied de chacun des appuis, sur le pivot ou en partie supérieure. L'intérêt des mesures de balance dynamométrique et des prises de pression est de vérifier la cohérence des valeurs et d'évaluer les surfaces représentatives des pressions mesurées autour de la prise de pression.

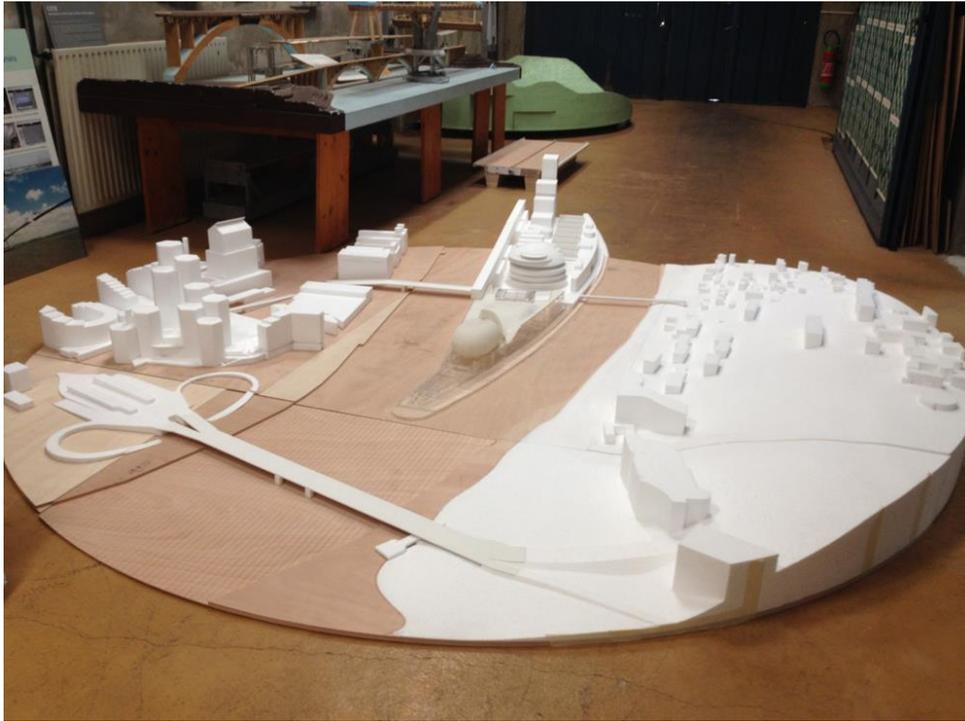


Figure 34 : Maquette au 1/250e : Reproduction de l'environnement sur un rayon de 450 mètres centré sur l'auditorium de la Seine Musicale

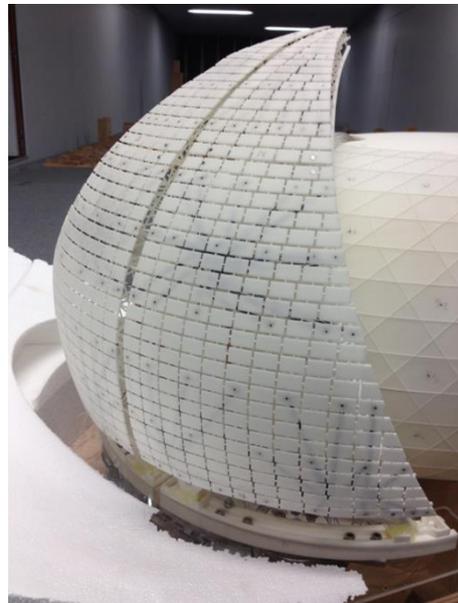
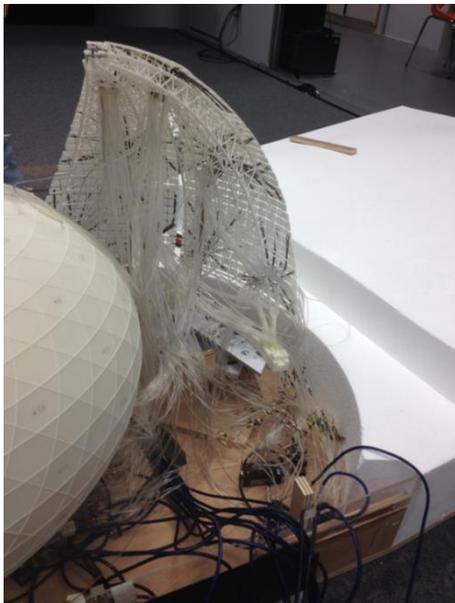


Figure 35 : Etude du voile solaire de la Seine musicale, capteur de pression et balance dynamométrique

4.4.2.3. Conclusion

Les essais en soufflerie sont utilisés pour les ouvrages de formes non classiques ou en cas d'environnement proche complexe. Pour la mise en œuvre de ce type d'étude, plusieurs points d'attention sont à souligner : le respect des similitudes, la bonne représentation de la couche limite atmosphérique, la mesure synchrone des

prises de pression ainsi que l'adéquation des fréquences de mesures d'acquisition par rapport au phénomène que l'on veut caractériser.

4.5. Schéma de synthèse

Le schéma ci-après a été élaboré par le GT pour récapituler les étapes de l'application de l'Eurocode 1-4 (et les chapitres de l'Eurocode 1-4 concernés) ainsi que les étapes auxquelles peuvent intervenir les méthodes alternatives évoquées précédemment.

La colonne « Approche alternative » indique des pistes envisagées par le GT pour l'établissement de valeur de vent WENRA ainsi que pour l'étude des actions du vent sur les structures.

EUROCODE - EN 1991-1-4 et AN

APPROCHES ALTERNATIVES

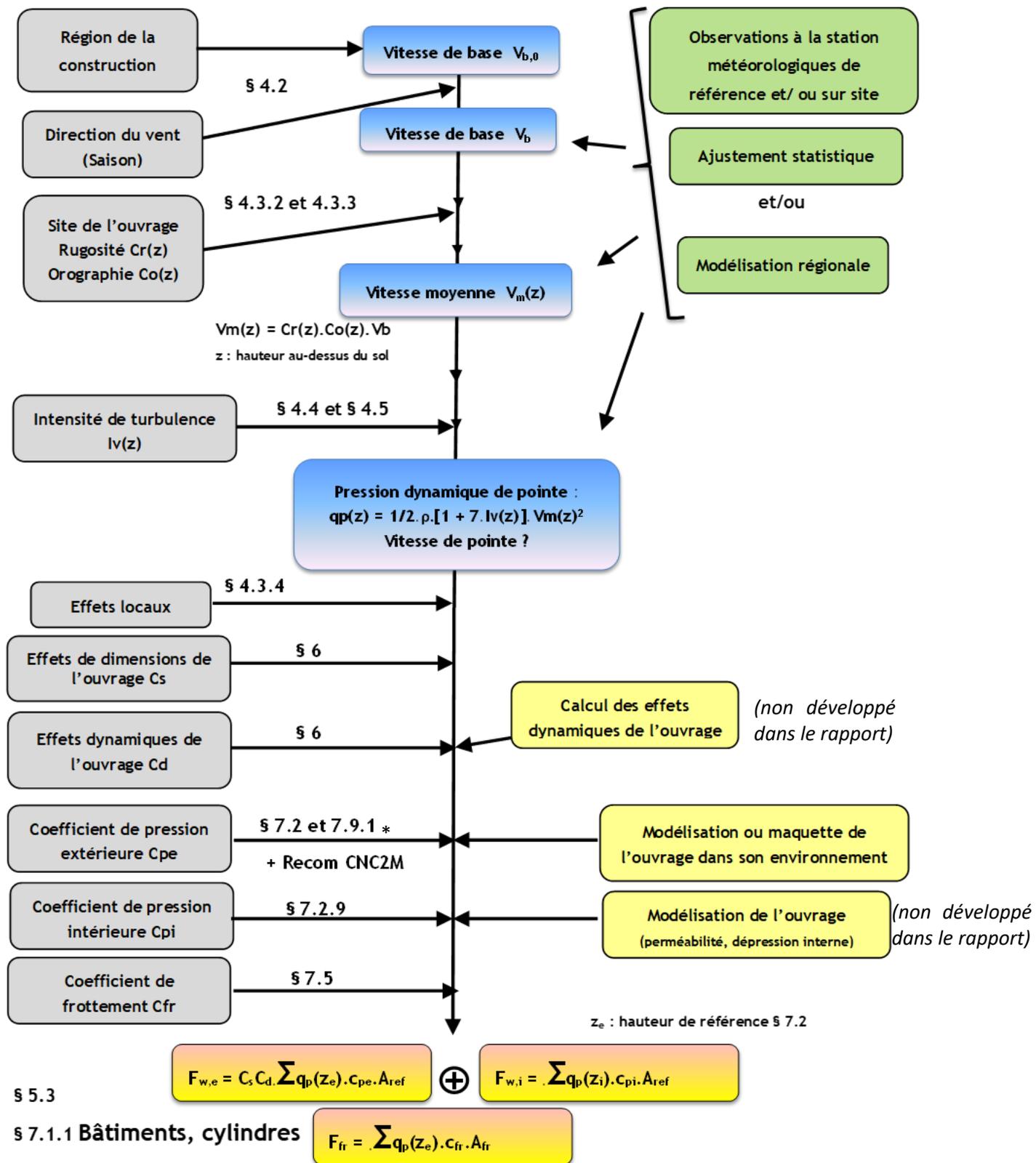


Figure 36 : Etapes de l'application de l'Eurocode 1-4 et méthodes alternatives

* Recommandations de la CNC2M pour l'application de la NF EN 1991-1-4 aux charpentes et ossatures en acier de bâtiment » publiées en juillet 2017

4.6. Effets indirects (projectiles)

Cette partie a été rédigée par les exploitants sous la coordination d'EDF. Les points de divergence sur les propositions faites par les exploitants ont été tracés dans la partie de synthèse et préconisation (§ 4.6.6).

4.6.1. Référentiel EDF

4.6.1.1. Référentiel PGGV applicable sur les CNPE en fonctionnement d'EDF

Pour EDF, les Projectiles Générés par le Grand Vent (PGGV) font l'objet d'un référentiel appliqué aux CNPE en fonctionnement (référentiel PGGV). Dans ce contexte, les PGGV susceptibles de dégrader les équipements qui assurent une fonction de sûreté de l'installation ont une masse non négligeable, une capacité d'envol et sont suffisamment rigides pour pouvoir aggraver d'autres structures ou matériels.

Les projectiles considérés sont de deux types :

- les projectiles lourds qui sont traînés sur le sol,
- les projectiles légers que l'on considère à toutes altitudes et dans toutes les directions.

Les projectiles retenus sont définis ainsi :

- un projectile de type « planche de bois » (de dimensions 3,70 m x 0,3 m x 0,09 m et de 50 kg), avec une vitesse prescrite de 50 % de la vitesse de vent forfaitaire,
- un projectile de type « tôle de bardage » (de dimensions 1 m x 6 m et de 60 kg), avec une vitesse prescrite de 100 % de la vitesse de vent forfaitaire,
- un projectile de type « automobile » (de dimensions 3,8 m x 1,5 m x 1,3 m et de 900 kg), traîné au sol, avec une vitesse prescrite de 3 m/s.

La vitesse forfaitaire majorante considérée est une vitesse de vent instantanée (rafale) qui correspond aux vitesses extrêmes de base (à 10 m) fournies par les règles NV65 révision 2000 en fonction de la localisation des sites majorées par le coefficient correspondant à la prise en considération de l'effet de site (normal/exposé). Les pourcentages retenus forfaitairement pour définir les vitesses du projectile « planche de bois » ou « tôle de bardage » couvrent en particulier les effets locaux dont la hauteur.

Les projectiles retenus sont issus des projectiles types retenus pour les tornades (US) [84] et de l'observation réalisée sur site lors d'épisodes de Grand Vent. Ces projectiles sont représentatifs de l'ensemble des risques inhérents aux situations « venteuses » (hors vent de tornade).

D'une façon générale, l'énergie des projectiles susceptibles d'être générés par les Grands Vents présentant des maximaux en rafales de l'ordre de 200 km/h n'est pas suffisante pour endommager les structures ou ouvrages de génie civil remplissant ou contenant une fonction de sûreté (effet d'impact localisé négligeable sur la stabilité d'ensemble d'un bâtiment).

Les cibles potentielles considérées sont donc celles situées à l'extérieur des structures ou ouvrages de génie civil. Les matériels situés à l'intérieur des bâtiments sont réputés protégés contre les PGGV. Une analyse de l'atteinte potentielle de cibles situées dans les bâtiments présentant des fragilités aux PGGV est effectuée.

4.6.1.2. Type de protection mis en œuvre

Les cibles de sûreté situées en extérieur sont protégées du risque de l'agression de projectiles par la mise en œuvre de protections métalliques. Ces structures sont constituées d'une ossature métallique autostable, habillée de panneaux de protections métalliques qualifiées aux impacts et qui peuvent être par exemple :

- des panneaux de caillebotis,
- des filets métalliques de protection (type filets chute de pierres employées en haute montagne),
- des tôles de bardage suivant certaines spécifications de pose (double recouvrement ou double peau),

- des tôles métalliques pleines d'une épaisseur de 4 mm minimum.

4.6.1.3. Justification des protections

La justification des protections est réalisée par des campagnes d'essais et des calculs qui ont pour vocation de confirmer l'aptitude des sous-composants de la structure (panneaux, assemblages, etc.) à recevoir l'impact et à se déformer dans le domaine plastique du matériau sans subir de rupture intégrale, qui serait préjudiciable aux cibles derrière la protection. Pour les panneaux de protection, des essais de qualification sont également menés pour vérifier leur capacité à stopper le projectile doté de l'énergie cinétique correspondant au référentiel, sans subir de perforation par laquelle le projectile pourrait s'insérer. Les justifications ont été menées avec la planche de bois, ayant un pouvoir perforant avéré sur la cible contrairement à la tôle de bardage qui en raison de sa très faible inertie se déforme sous impact et dissipe sa propre énergie cinétique.

De ces essais découlent un ensemble de paramètres de conditions de mise en œuvre à respecter pour le déploiement de chaque système qualifié : nuance des matériaux et boulonneries, densité de fixations, portée maximale du panneau etc. et surtout valeur maximale de la déflexion du panneau après impact. Cette valeur est capitale car elle conditionne la distance de recul minimale de la cible par rapport aux composants de la protection.

4.6.1.4. Calculs des ossatures métalliques de protection

Les ossatures métalliques font l'objet d'un calcul de structure global en vue de garantir la stabilité d'ensemble sous les sollicitations d'impacts des projectiles. En fonction de la géométrie de l'ossature, d'autres cas de charges sont pris en compte dans les calculs de justification (actions climatiques, température, séisme...)

4.6.1.5. Ouvrages de génie civil présentant des fragilités aux effets des PGGV

Les cibles situées en intérieur d'ouvrages de génie civil présentant des fragilités aux effets des PGGV, par exemple, les singularités des parois du bâtiment (autres que les zones courantes de béton ou bardage double peau, considérées robustes aux projectiles) sont toutes passées en revue et analysées. Elles peuvent être de différentes natures : trémies, dalles amovibles, portes, trappes au sol, grilles de ventilation, lanterneaux, fenêtres, etc. En fonction de leur composition, ces singularités sont jugées robustes ou fragiles, par analogies et comparaison aux systèmes déjà qualifiés par essais (par exemple, la tôle larmée 5/7mm est couverte par la qualification de la tôle de 4mm d'épaisseur).

En cas de singularités jugées fragiles pouvant induire une fragilité dans la paroi du bâtiment, 3 options peuvent être déployées :

- analyse de trajectoires et localisation des cibles pour confirmer si un projectile peut ou non atteindre une cible par cette fragilité,
- renforcement de la fragilité en question par un dispositif robuste au PGGV. A titre d'exemple, des grilles de ventilation ont été remplacées par des grilles résistantes aux projectiles,
- mise en œuvre d'une protection PGGV au plus près de la cible dans le bâtiment comme si celle-ci était située en extérieur.

4.6.2. Référentiel ORANO

Des projectiles spécifiques aux vents extrêmes peuvent être retenus dans l'analyse vis-à-vis de leurs impacts sur des équipements assurant des fonctions de sûreté.

Ainsi pour le site de La Hague, les projectiles considérés sont classés en trois catégories, pour lesquelles des projectiles types considérés comme représentatifs sont définis :

- les « projectiles flottants », susceptibles d'être déplacés à toute hauteur : un projectile surfacique type bâche souple.

- les « projectiles surfaciques », susceptibles d'être déplacés à toute hauteur : un projectile type tôle de bardage (longueur : 5,45 m, largeur : 1,08 m, épaisseur : 0,75 mm, masse : 40 kg, vitesse maximale comprise entre 25 et 50 % de la vitesse du vent) ;
- les « projectiles massifs et volumineux », ne pouvant être déplacés qu'au sol et ne pouvant impacter que les éléments situés à leur hauteur.

Deux projectiles types :

- poubelle urbaine (longueur : 126 cm, largeur : 107 cm, hauteur : 130 cm, masse : 200 kg, vitesse maximale égale à 25 % de la vitesse du vent,
- véhicule (longueur : 3,8 m, largeur : 1,50 m, hauteur : 1,30 m, masse : 900 kg, vitesse égale à 10,8 km/h = 3 m/s).

La méthodologie appliquée sur le site de La Hague est divisée en 4 étapes :

- établissement de la liste des équipements de sûreté sensibles aux projectiles vent.
- catégorisation des équipements de sûreté sensibles aux projectiles vent selon leur position :
 - dans un bâtiment avec structure métallique couverte de bardage,
 - en terrasse des bâtiments,
 - en façade des bâtiments,
 - directement au niveau du sol ;
- en fonction de la catégorie, identification des types de projectiles pouvant atteindre l'équipement (par exemple : pas de véhicule à considérer en terrasse des bâtiments) ;
- étude des conséquences redoutées en cas de perte de la fonction (par exemple, pas d'impact d'une bâche sur l'intégrité d'un bardage) analyse des dispositions de détection, prévention et mitigation en cas de dégradation, dispositions complémentaires à mettre en œuvre.

Pour le site du Tricastin, la problématique retenue est celle du décrochement d'un bardage et est traitée au travers d'une analyse de l'impact limité sur les installations (vis-à-vis des questions de sûreté), ou par la mise en œuvre d'une vérification périodique de la qualité des attaches des éléments constituant le bardage dans le cas d'éléments sensibles (risque d'agression des vannes de cylindres en parcs d'entreposage).

Pour ORANO, les projectiles générés en cas de vents extrêmes ne sont pas considérés en tant que tels dans les critères généraux de dimensionnement des structures de génie civil. Pour ces dernières, les critères retenus correspondent à l'occurrence de tornades, incluant l'effet de projectiles, conformément au référentiel ORANO spécifique à ces dernières.

4.6.3. Projectiles retenus par l'ANDRA, Framatome et le CEA

Pour les centres en exploitation et en projet de l'ANDRA, les projectiles retenus sont ceux liés à la tornade et non aux grands vents.

Hormis pour le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) de Cadarache, le CEA ni Framatome ne définissent de projectiles pour le vent.

Des éléments d'analyse complémentaires transmis par le CEA sont présentés en Annexe 12.

4.6.4. Projectiles retenus pour la prise en compte des effets des tornades

Cette partie présente les projectiles tornades qui ont été retenus par l'ASN dans la lettre de suite de l'instruction du référentiel tornade [21].

« Pour les projectiles induits par la tornade, je vous demande de retenir :

- pour les éléments importants pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement (EIP) ne faisant pas partie du « noyau dur », un projectile de type « planche de bois » (de

dimensions 0,10 m x 0,25 m x 3,80 m et de 50 kg) et un projectile de type « bille d'acier » (de 2,5 cm de diamètre et 70 g) ;

- pour les EIP du « noyau dur », un projectile de type « bille d'acier » (de 2,5 cm de diamètre et 70 g), un projectile de type « tube d'acier » (de diamètre 0,17 m, de longueur 4,6 m et de 130 kg) et un projectile de type « automobile » (de dimensions 4,5 m x 1,7 m x 1,5 m et de 1180 kg). Pour les automobiles, les hauteurs minimales de déplacements sont de trois mètres pour les tornades d'intensité EF3 et de 9 m pour les tornades EF4 ;

- une vitesse horizontale des projectiles respectivement égale à un tiers de la vitesse du vent de la tornade pour les projectiles de type « planche de bois », « tube d'acier » et « automobile » et à 8 % de la vitesse du vent de la tornade pour le projectile de type « bille », ainsi qu'une vitesse verticale égale aux deux tiers de la vitesse horizontale du projectile. »

4.6.5. Pratiques internationales et synthèse de pratiques recensées dans différents cadres

Dans le cadre d'un groupe de travail WGEV⁵⁵ de l'OCDE sur les agressions externes, un recueil de pratiques a été fait à l'international sur les aspects réglementaires, techniques, et sur les perspectives concernant les activités de recherche. Une dizaine de pays a répondu et les enseignements principaux seront tracés dans une note de synthèse.

La majorité des pays envisagent différents types de projectiles associés aux tornades. Plusieurs pays retiennent des caractéristiques de projectiles issues de règles américaines. Les types de missiles mentionnés sont : sphère d'acier, tube d'acier, planche de bois, voiture particulière.

Certains pays considèrent des projectiles associés aux tempêtes et aux ouragans. Un seul pays mentionne les types de projectiles retenus : voiture, planche de bois et tôle de bardage.

Le recensement des pratiques internationales a également montré que pour l'instant, une minorité de pays cumulent la prise en compte des effets directs et indirects (par exemple le Canada pour les EPS).

Les projectiles définis dans les Regulatory guides RG 1.76 [84] et RG 1.22.1 [85] qui concernent respectivement les tornades et les ouragans sont repris dans le tableau ci-après. Les vitesses horizontales des projectiles sous ouragans du RG 1.221 sont déterminées pour des sites de type « rase campagne » et pour des rafales de vent d'une durée de 3 secondes. Il est précisé que les projectiles définis dans le RG 1.221 ne sont pas imposés par la US NRC aux installations existantes et concernent seulement les réacteurs électronucléaires. Le tableau récapitule les projectiles retenus dans différents cadres d'évaluation de la sûreté.

Concernant le RG 1.22.1, le CEA a produit une analyse des hypothèses de vitesses de projectiles et du rapport NUREG/CR-7004 [86] en Annexe 12.

⁵⁵ Working Group on External Events

Tableau 11. Projectiles retenus actuellement dans différents cadres d'évaluation de la sûreté

projectiles	exemple	EDF (PGGV)	ORANO (La Hague)	Tornade « hors noyau dur » (lettre ASN)	Tornade « noyau dur » (lettre ASN)	NRC (RG 1.76) Tornade (Région 3)	NRC (RG 1.22.1) Ouragan
Rigide, perforant	planche de bois *	3,70 m x 0,3 m x 0,09 m, 50 kg 50 % V _{vent_10m}		0,10 m x 0,25 m x 3,80 m, 50 kg $V_{horizontal} = 1/3 \times V_{vornade\ EF2}$ (55 m/s) $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$			
Rigide, perforant	Tube d'acier*				0,17 m x 4,6 m, 130 kg $V_{horizontal} = 1/3 \times V_{vornade\ EF3\ ou\ EF4}$ $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$	0,168 m x 4,58 m, 130 kg $V_{horizontal} = 1/3 \times V_{vornade}$ $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$	0,168 m x 4,58 m, 130 kg $V_{horizontal}$ entre 30 et 40 % environ de $V_{vent\ iinst_35}$ ⁵⁶ Design-basis vertical missile velocity for all missiles: 26 m/s
Rigide Surfacique,	tôle de bardage*	1 m x 6 m, 60 kg 100 % V _{vent_10m}	5,45 x 1,08 x 0,75mm, 40 kg 25 à 50 % V _{vent}				
flottant	Bâche*		Oui				
Massifs et volumineux	Automobile (mou mais pouvant affecter la stabilité de la structure)	3,8 m x 1,5 m x 1,3 m, 900 kg, 3m/s au sol	3,8 m x 1,5 m x 1,30 m, 900 kg, 3m/s au sol		4,5 m x 1,7 m x 1,5 m, 1180 kg Alt < 3m si EF3 Alt < 9 m si EF4 $V_{horizontal} = 1/3 \times V_{vornade\ EF3\ ou\ EF4}$ $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$	4,5 m x 1,7 m x 1,5 m, 1180 kg	5 m x 2 m x 1,3 m, 1810 kg $V_{horizontal}$ entre 40 et 55 % environ de $V_{vent\ iinst_35}$ ⁵⁷ Design-basis vertical missile velocity for all missiles: 26 m/s
Massifs et volumineux	Poubelle urbaine*		1,26 m x 1,07 m x 1,30 m, 200 kg, 25 % V _{vent}				
Mitrailant	Bille d'acier*	+ historique VD3 1300 (finalemt, l'ASN n'a pas retenu de projectiles billes (complémentarité avec tornade)		∅ 2,5 cm, 70 g 8 % V _{tornado EF2} (55 m/s) $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$	∅ 2,5 cm, 70 g 8 % V _{tornado EF3 ou EF4} $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$	∅ 2,54 cm, 67g $V_{horizontal} = 8 \% \times V_{vornade}$ $V_{verticale} = 2/3 \times V_{horizontale}$	∅ 2,54 cm, 67g $V_{horizontal}$ entre 25 et 35 % environ de $V_{vent\ iinst_35}$ ⁵⁸ Design-basis vertical missile velocity for all missiles: 26 m/s

* toute altitude et direction

⁵⁶ Pour des vitesses instantanées sur 3 s comprises entre 40 et 70 m/s.

⁵⁷ Pour des vitesses instantanées sur 3 s comprises entre 40 et 70 m/s.

⁵⁸ Pour des vitesses instantanées sur 3 s comprises entre 40 et 70 m/s.

4.6.6. Synthèse et préconisations

4.6.6.1. Projectiles de référence

Sur la base de l'analyse des caractéristiques proposées pour les projectiles Tornade (hors ND et ND) du courrier de lettre de suite ASN pour la tornade [21], de l'analyse des caractéristiques de projectiles des référentiels actuels des exploitants (EDF et ORANO La Hague), des projectiles définis dans les Regulatory guides RG 1.76 [84] (tornade) et RG 1.22.1 [85] (ouragan), ainsi que sur le REX des événements significatifs de vent, les exploitants ont proposé un ensemble de projectiles standards à considérer dans le cadre des études d'analyse des projectiles générés par le vent.

L'IRSN présente ses remarques en fin de partie.

Projectiles standard

Les exploitants proposent un spectre de projectiles standards qui peut, quand nécessaire, être complété, en particulier en s'appuyant sur des analyses fonctionnelles.

Les exploitants préconisent de considérer les caractéristiques des projectiles présentées dans le tableau suivant.

Tableau 12. Projectiles de référence proposés par les exploitants

Projectile	Description	Caractéristiques	Vitesses
Planche de bois	Rigide et perforant	0.1m x 0.25m x 3.80m ; 50kg	Vh = 1/3 Vwenra à 10m et Vv=2/3 Vh
Automobile	Massif et volumineux	3.8m x 1.5m x 1.3m ; 900kg	3m/s au sol

Pour les exploitants, en cas d'absence de tout projectile potentiel situé au-dessus de la cible ou suffisamment éloigné de cette dernière, le projectile planche de bois peut être exclu. Dans le cas où un projectile autre qu'une planche de bois est présent et susceptible d'endommager une structure ou un composant intervenant dans la démonstration de sûreté, un projectile alternatif peut être retenu, sous réserve de justifier le caractère enveloppe de ce dernier, notamment à l'occasion d'évolutions durable ou non de l'environnement.

Le projectile automobile couvre tous les projectiles massifs et volumineux pouvant être traînés au sol sous l'effet d'un vent fort. Les exploitants considèrent que ce projectile peut être exclu pour un cas particulier s'il y a présence d'un écran protégeant la cible (un trottoir de hauteur suffisante pour bloquer le véhicule pouvant être considéré comme écran) ou s'il existe une distance d'exclusion suffisante entre l'automobile et la structure ou les équipements intervenants dans la démonstration de sûreté.

Pour les projectiles qui seront retenus finalement, le CEA propose de pouvoir justifier, si nécessaire pour chaque site ou chaque installation, les hauteurs et les distances d'impact ainsi que les vitesses horizontales et verticales d'impact par des calculs de balistiques ou des essais, en tenant compte de marges significatives.

Projectiles complémentaires :

En fonction de la configuration de l'installation, les projectiles suivants peuvent être considérés dans le cadre d'analyses complémentaires :

- Tôle de bardage : un projectile rigide et surfacique,
- Bâche souple : un projectile flottant et surfacique.

Les exploitants considèrent que les dimensions de ces projectiles sont définies au cas par cas selon les configurations rencontrées sur site.

Projectiles non retenus par les exploitants

La bille d'acier n'est pas retenue au vu de ses caractéristiques (diamètre de 2,5cm et une masse de 70g). Celle-ci n'est pas dimensionnante pour les ouvrages de génie civil, et ce projectile est couvert par les analyses fonctionnelles réalisées dans le cadre des études « Tornado ».

La poubelle urbaine n'est pas retenue car couverte par la planche de bois en termes d'impact et par le projectile tôle de bardage.

Commentaires apportés par l'IRSN

L'IRSN considère que le principe de la démarche proposée par les exploitants d'étudier l'impact de projectiles types de référence est pertinent. Dans une telle démarche, les projectiles types de référence sont enveloppes des projectiles réels susceptibles de s'envoler. Ils doivent être considérés de manière forfaitaire pour représenter l'effet de divers projectiles dont la présence ne peut pas être exclue a priori.

L'IRSN ne partage pas l'avis des exploitants sur un certain nombre de points suivants.

L'IRSN considère qu'on ne peut pas exclure le projectile de type planche de bois du simple fait de l'absence de projectile potentiel situé au-dessus de la cible ou suffisamment éloigné de cette dernière.

La valeur de la vitesse horizontale de la planche de bois proposée par les exploitants pourrait être sous-estimée. Celle-ci est équivalente à celle retenue pour le projectile « planche de bois » de la tornade alors que différentes sources bibliographiques indiquent que les projectiles ont une vitesse supérieure s'ils sont déplacés par un vent dépressionnaire plutôt que par une tornade d'intensité équivalente ([85],[87]).

L'IRSN note que le projectile de type « automobile » est différent du projectile de même type retenu dans le référentiel tornade : la masse et les dimensions de l'automobile nécessiteraient d'être justifiées en regard des projectiles massiques et volumineux potentiels, la vitesse de déplacement pourrait également être sous-estimée en fonction de ces caractéristiques et du vent Wenra. De plus, l'IRSN souligne que la présence d'un trottoir apparaît insuffisante pour faire écran au déplacement d'un projectile massique et volumineux (voiture ou autre projectile pouvant être traîné au sol).

Enfin, l'IRSN considère nécessaire de tenir compte d'un projectile de type bille d'acier indépendamment des projectiles déjà définis dans le référentiel tornade, en tant que projectile criblant. Par ailleurs, l'IRSN considère que les caractéristiques minimales d'un projectile de type tôle de bardage sont à définir.

L'IRSN propose de définir les projectiles de référence suivants :

- *projectile massique et volumique de type « automobile »,*
- *projectile perforant de type « planche de bois », considéré indéformable et pouvant impacter la structure ou l'équipement avec une trajectoire et un angle d'impact quelconques,*
- *projectile criblant de type « bille d'acier »,*
- *projectile obstruant de type « tôle de bardage ou bâche ».*

Ces projectiles types et leurs caractéristiques sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 13. Projectiles de référence proposés par l'IRSN

Projectiles de référence	Masse	Dimensions	Vitesse
Massique et volumique de type « automobile »	900 kg ou 1180 kg ⁵⁹	3,8 x 1,5 x 1,3 m ou 4,5 m x 1,7 m x 1,5 m ⁶⁰	> 3m/s (une vitesse de 3 m/s pourrait être insuffisante)
Perforant de type « planche de bois »	50 kg	0,10 m x 0,25 m x 3,80 m	$V_{horizontal} = 50 \% V_{WENRA}$ à 10m $V_{vertical} = 2/3 V_{horizontal}$
Criblant de type « bille d'acier »	70 g	$\Phi = 2,5 \text{ cm}$	$V_{horizontal} = 8 \% V_{WENRA}$ à 10m $V_{vertical} = 2/3 V_{horizontal}$
Obstruant de type « tôle de bardage ou bâche »	-	1m x 6 m ⁶¹	-

Le projectile de type « automobile » impacte la structure ou l'équipement en étant au niveau du sol.

Les trois autres projectiles de référence peuvent impacter la structure ou l'équipement à toute hauteur, ainsi qu'en terrasse.

L'effet du projectile obstruant se limite à l'obturation d'ouvertures (grille de ventilation, etc.). Il n'est pas considéré comme un projectile impactant le génie civil.

4.6.6.2. Prise en compte des effets directs et indirects

Le GT recommande que l'effet direct du vent WENRA et l'effet indirect d'un projectile soient pris en compte simultanément. Un seul projectile à la fois est pris concomitant à l'effort du vent.

4.7. Effets sur les ventilations

Le vent et les projectiles générés par le vent peuvent avoir plusieurs impacts sur les systèmes de ventilation : risque de survitesse des ventilateurs, obturation des grilles de ventilation, dégradation ou perte du confinement. Ces différents effets et les pratiques des exploitants relatives à leurs prises en compte sont détaillés dans les paragraphes ci-après, complétés par des travaux menés à l'IRSN.

4.7.1. Effets de survitesse sur la ventilation

4.7.1.1. Description

En cas de vent fort, le vent peut mettre en survitesse les ventilateurs. Le vent incident induit un couple aérodynamique sur le ventilateur pouvant modifier le point de fonctionnement du système moteur/ventilateur. Dans des cas extrêmes, cela provoque un changement de régime : au lieu d'être un élément moteur avec une pression en aval plus grande que la pression en amont, le ventilateur peut alors adopter un comportement résistif avec une pression en aval qui devient inférieure à la pression en amont (passage en mode "turbine") ce qui peut avoir pour effet de déséquilibrer totalement le réseau et de mettre en péril le confinement dynamique. La régulation en pression dans le plénum en aval des ventilateurs de soufflage peut participer à limiter ces effets.

⁵⁹ une homogénéisation avec le véhicule retenu pour la tornade pourrait être judicieuse.

⁶⁰ Idem, une homogénéisation avec le véhicule retenu pour la tornade pourrait être judicieuse.

⁶¹ Reprise du projectile tôle de bardage EDF en l'absence de proposition des exploitants.

Il convient de noter que tous les ventilateurs sont sensibles aux risques de survitesse liés aux vents. Cette sensibilité dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels on peut citer :

- la technologie : les ventilateurs axiaux sont plus sensibles que les centrifuges (qui tournent très vite),
- la configuration de mise en œuvre : directement sous influence du vent ou au sein d'un ensemble d'équipements qui peuvent en atténuer les effets (par exemple dans le cas d'une centrale de traitement d'air de soufflage),
- le régime du ventilateur : une vitesse de rotation réduite accroît cette sensibilité,
- la direction du vent par rapport à l'axe d'aspiration d'air du ventilateur.

Au regard de la démonstration de sûreté qui doit permettre d'appréhender la sensibilité d'un ventilateur à la survitesse due aux vents, des exigences de conception, de construction et d'exploitation peuvent être définies.

4.7.1.2. Etat des lieux des pratiques des exploitants

Les éléments présentés ci-après sont issus des informations fournies par les exploitants dans le cadre du groupe de travail « Vent et Neige ».

EDF

Les niveaux de Grands Vents retenus dans les études menées actuellement par EDF sont les niveaux définis dans les règles NV65 2009 [60].

Concernant les effets directs des vents extrêmes, la robustesse des installations s'appuie sur les exigences retenues par EDF lors de la conception, de la construction et de l'exploitation des équipements concernés. La résistance des ventilateurs vis-à-vis du phénomène de survitesse fait en particulier l'objet de spécifications d'EDF à la conception.

L'effet de la vitesse du vent sur les ventilateurs dépend de leurs configurations d'installation, des technologies de ventilateurs utilisées et de leurs conceptions. Ces éléments sont détaillés en Annexe 13.

Le risque de survitesse est écarté pour la famille de ventilateurs :

- de technologie centrifuge,
- en intérieur et installés sur une extraction ou raccordés à la cheminée du bâtiment des auxiliaires nucléaires BAN,
- en extérieur à condition d'être placés en aval d'un organe présentant une perte de charge (aéroréfrigérants),
- de technologie axiale dont l'axe est perpendiculaire à la direction du vent.

Le risque de survitesse ne peut pas être écarté pour la famille de ventilateurs de technologie axiale (ou hélicoïde) qui sont directement exposés aux effets du vent dont l'axe est parallèle à la vitesse du vent. Les spécifications techniques de ces matériels intègrent le risque de survitesse des ventilateurs qui couvrent les effets de survitesse liés au vent. En complément, des études spécifiques d'aérodynamiques et de mécanique peuvent être menées pour vérifier la tenue de ces matériels au risque de survitesse liée au vent.

ANDRA

La prise en compte du risque potentiel de survitesse des ventilateurs en cas de grands vents diffère selon les installations de l'ANDRA.

Pour le CSM, le fonctionnement de la ventilation n'est pas requis en situation de grands vents. Son exploitation relève du fonctionnement normal dans la mesure où elle n'est requise que pour permettre la réalisation ponctuelle d'activités dans les locaux à risque radon.

Pour le CSA, le risque de survitesse en situation de grands vents sera pris en compte dans le cadre du prochain réexamen de sûreté.

Pour Cigéo, le dimensionnement des systèmes de ventilations est fondé sur la rose des vents, qui fournit l'orientation des vents dominants permettant de déterminer la position de la prise d'air neuf et l'implantation de l'émissaire de rejet, et la vitesse des vents dominants à considérer lors des dimensionnements des ventilateurs. Les ventilateurs sont de technologie axiale (les prises d'air sont positionnées de façon qu'elles ne soient pas directement soumises aux effets du vent) et centrifuge. Le risque de survitesse est écarté pour cette technologie de ventilateur.

CEA

Le CEA ne considère pas d'effet de survitesse sur les moto-ventilateurs lors de grands vents compte tenu des éléments de configuration d'installation retenus :

- les amenées d'air sont conçues et positionnées en fonction des vents dominants,
- les prises d'air neuf sont mises en œuvre en dehors des axes des vents dominants ou sont conçues omnidirectionnelles,
- les amenées d'air sont protégées par des systèmes brise-vent anti-gavage (parois au droit des ouvrants d'amenée d'air permettant de casser la dynamique du vent),
- les ventilateurs d'extraction sont de type centrifuge, reliés, après le clapet anti-retour, à un émissaire ;
- des pans inclinés sont positionnés en partie haute d'émissaire de grand diamètre pour créer un flux ascensionnel (augmentation de la vitesse d'éjection du flux d'air et limitation de la contre-pression),
- les ventilateurs de soufflage sont de types, soit centrifuge, soit axial (CTA). Ils sont positionnés après une barrière de filtration grossière et moyenne, batterie de réchauffage et chauffage à minima (batterie de refroidissement ou batteries de déshumidification sur certaines).

ORANO

Les effets de survitesse sur les ventilateurs ne sont pas considérés dans la démonstration de sûreté.

FRAMATOME

Les effets de survitesse sur les ventilateurs ne sont pas considérés, car la perte du confinement dynamique conduit à une mise à l'arrêt des équipements, mais l'installation reste dans un état sûr.

4.7.2. Obturation des ventilations

4.7.2.1. Description

En situation de vents extrêmes, les ventilations peuvent s'obturer par des objets soulevés par le vent. Ainsi, les dispositions envisagées doivent permettre de :

- vérifier le maintien du fonctionnement des ventilations en cas d'obturation,
- contrôler l'état des ventilations avant leur redémarrage,
- en cas d'obturation des ventilations, prévoir des actions de réparation dans un délai acceptable ou au moins garantir un état sûr de l'installation.

4.7.2.2. État des lieux des pratiques des exploitants

Les éléments présentés ci-après sont issus des informations fournies par les exploitants dans le cadre du groupe de travail « Vent et Neige ».

EDF

EDF vérifie qu'une agression des grilles de ventilation des systèmes importants pour la sûreté requis au titre de du référentiel Projectiles Générés par Grand Vent (PGGV) par un projectile généré par le vent ne remet pas en cause le conditionnement des locaux. La possibilité d'une agression des équipements situés derrière des grilles de ventilation et requis au titre du référentiel PGGV est également vérifiée.

Concernant le risque de colmatage et d'obstruction des ouvertures de ventilation, EDF estime qu'il n'est pas plausible sur une durée suffisamment importante pour remettre en cause le conditionnement thermique des locaux.

Le spectre de projectile retenu pour le référentiel PGGV est défini dans le § 3.2.1. Le projectile « mou » retenu est la tôle de bardage. Si une tôle de bardage heurte une grille de ventilation, elle retombera sur le sol sous l'effet de son poids. Il n'est donc pas considéré de cas d'obstruction des grilles de ventilation par le projectile tôle de bardage.

ANDRA

La prise en compte du risque potentiel d'obturation des ventilations en cas de grands vents diffère selon les installations de l'ANDRA.

Pour le CSM, le fonctionnement de la ventilation n'est pas requis en situations de grands vents. Son exploitation relève du fonctionnement normal dans la mesure où elle n'est requise que pour permettre la réalisation ponctuelle d'activités dans les locaux à risque radon.

Pour le CSA, le risque d'obturation des ventilations en situation de grands vents et de tornade sera pris en compte dans le cadre du prochain réexamen de sûreté.

Pour Cigéo, la ventilation de soufflage est automatiquement arrêtée et les registres d'isolement sont fermés sur détection d'une pression différentielle inacceptable au niveau des centrales de traitement d'air. En parallèle, la ventilation d'extraction est automatiquement passée en régime réduit. Cette disposition permet notamment de conserver la fonction de confinement dynamique. Dans l'hypothèse d'une détection d'inversion de la cascade des dépressions, le contrôle-commande du réseau de ventilation nucléaire procède à l'arrêt automatique des réseaux de soufflage et d'extraction et à la fermeture des registres d'isolement motorisés.

ORANO

Le risque d'obturation par des objets déplacés par le vent est étudié dans l'analyse des projectiles du site de La Hague (cf. « bache » mentionnée au § 4.6.2), en fonction de la hauteur à laquelle se situe l'orifice (permettant d'écartier des scénarios d'atteinte de la sortie des cheminées par exemple).

Les dispositions d'exploitation mises en œuvre en cas de grand vent ou de vent violent, permettent par ailleurs de réduire les risques d'envol de projectiles susceptibles d'obstruer les ventilations : sécurisation des abords des bâtiments, arrimage ou mise à l'abri de fournitures (calorifuges...), matériels ou équipements susceptibles d'être emportés par le vent (non ou mal fixés), évacuation de déchets éventuellement présents (cartons, bâches...).

Le cas échéant, dès retour à la normale, des rondes peuvent permettre d'apprécier les éventuelles anomalies.

CEA

L'obturation des ouvertures de ventilation n'est pas postulée sur les installations du CEA pour le dimensionnement des amenées d'air ou du refoulement d'air lors de période de grands vents. Le CEA ne considère pas plausible l'obturation des ouvertures de ventilation par un projectile généré par un grand vent pendant une durée suffisamment importante pour induire une modification significative du régime aérodynamique, du fait notamment des dispositions constructives suivantes mises en œuvre :

- les amenées d'air sont conçues et positionnées en fonction des vents dominants,
- les prises d'air neuf sont mises en œuvre en dehors des axes des vents dominants ou sont conçues omnidirectionnelles en permettant une circulation d'air sur plusieurs faces, n'induisant ainsi pas d'obturation,
- les amenées d'air sont protégées par des systèmes brise-vent anti-gavage, empêchant la pénétration de projectiles de taille significative dans les conduits,
- chaque extraction d'air est reliée à un émissaire vertical, dont l'obturation en partie supérieure par un projectile généré par un grand vent n'est pas considérée plausible par le CEA.

FRAMATOME

Les effets d'obturations des ventilateurs ne sont pas considérés, car la perte du confinement dynamique conduit à une mise à l'arrêt des équipements, mais l'installation reste dans un état sûr.

4.7.3. Impact sur le confinement

4.7.3.1. Description

De façon générale, dans une installation nucléaire, le « confinement » est une notion fondamentale qui consiste à limiter autant que raisonnablement possible et à des niveaux acceptables et à mesurer la dispersion dans l'environnement des produits radioactifs à tout moment et en toutes circonstances (fonctionnement normal, incidentel et accidentel). Il s'agit d'une des trois fonctions de sûreté (contrôle de la réactivité, évacuation de l'énergie résiduelle, confinement des substances radioactives).

Le « confinement » comporte dans le cas général deux composantes complémentaires :

- le confinement « statique »⁶² apporté par l'étanchéité des bâtiments vis-à-vis de l'extérieur et des locaux (ou groupes de locaux) entre eux,
- le confinement « dynamique »⁶³ apporté par la ventilation.

Le confinement dynamique ne peut être effectué qu'à partir d'un confinement statique de bonne qualité. Le confinement statique est assuré par les dispositions constructives et d'exploitation du génie civil.

Deux aspects sont à distinguer pour le confinement dynamique :

- le confinement dynamique externe : la ventilation permet de maintenir une dépression à l'intérieur des bâtiments présentant un risque de contamination et permet de canaliser les effluents potentiels,
- le confinement dynamique interne : la ventilation doit assurer en permanence un sens de circulation entre les locaux présentant des niveaux de risque de contamination différents.

Sous l'effet du vent, certaines faces des bâtiments nucléaires seront en surpression et d'autres en dépression.

En situation de vent extrême, les systèmes, structures et composants subissent l'effet direct du vent lié à sa vitesse et des différences de pression (effet de dépression/surpression). Ces facteurs ont une influence sur le confinement dynamique assuré par le maintien en dépression des locaux à risque de contamination et donc sur la maîtrise des cascades de dépression. Le risque d'inversion des sens d'air entraînant une perte du confinement dynamique est donc à considérer.

Le confinement statique est apporté par l'étanchéité des bâtiments vis-à-vis de l'extérieur et des locaux (ou groupes de locaux). Cette étanchéité est contrôlée en exploitation. Le vent va influencer le renouvellement d'air dans le bâtiment en fonction de l'étanchéité de celui-ci.

Sous l'effet du vent, il peut également y avoir une perturbation de la prise de pression de référence et conduire à un décalage des pressions des locaux qui peut accentuer la diminution ou l'inversion de cascade de dépressions de certains locaux en périphérie de bâtiment par rapport à l'extérieur.

Pour ces deux effets du vent, il est nécessaire, en plus de rendre insensible aux effets du vent la prise de pression de référence (à l'abri, dans un caisson fermé, etc.), d'instaurer une dépression minimale suffisante dans les locaux à risques de dissémination de substances radioactives pour contrecarrer les dépressions extérieures

⁶² Le confinement statique repose sur des barrières physiques et passives (gaine des crayons combustible, circuit primaire, enceinte de confinement, réservoir de stockage...).

⁶³ Le confinement dynamique correspond à l'action permettant, grâce à une circulation maîtrisée de l'air, de limiter les rétrodiffusions entre deux volumes ou entre l'intérieur et l'extérieur d'une enceinte, de manière à éviter le rejet des substances radioactives hors d'un volume physique donné.

engendrées par les vents et de limiter en périphérie des bâtiments la présence des locaux à risque de dissémination avec des singularités du confinement statique (portes, traversées, sas camion, etc.).

4.7.3.2. Travaux de recherche menés à l'IRSN

Entre 2005 et 2016, l'IRSN a mené un programme de recherche sur l'influence du vent sur les écoulements d'air et les transferts de contamination dans les réseaux de ventilation. Ce programme, appelé TIVANO (Transferts Induits par le Vent en régime Accidentel et NOminal), s'est appuyé sur des expériences en soufflerie et des simulations numériques, en collaboration avec le CSTB.

La première phase de ce programme a consisté à acquérir en soufflerie les coefficients de pression exercés par le vent sur deux types d'installation (réacteur REP 900 MWe et laboratoire/usine) et sur différentes formes d'exutoires de cheminée. La confrontation des valeurs expérimentales à celles obtenues avec un logiciel CFD a démontré la capacité de la simulation CFD à prédire, pour la quasi-totalité des cas traités, les valeurs moyennes des coefficients de pression en utilisant une approche RANS de la turbulence (cf. § 4.4.1.2 et [76]) même si la simulation a été mise en défaut, dans les zones dépressionnaires, pour une des quatre incidences de vent étudiées sur la maquette représentative d'un REP 900 MWe. Il serait intéressant d'évaluer l'apport de l'approche LES ou hybride RANS/LES pour ce cas particulier.

Dans une seconde phase du programme, une étude de l'influence du vent sur les transferts de masse à l'intérieur des installations a été conduite, d'abord en situation isotherme, puis en situation anisotherme (couplage des effets du vent et des effets thermiques). Ces travaux ont permis de développer une méthodologie d'étude à échelle réduite des écoulements au sein d'installations ventilées (selon une approche par similitude), puis de valider le logiciel SYLVIA⁶⁴ de l'IRSN sur la base des données expérimentales acquises en soufflerie sur des maquettes d'installations munies d'un réseau de ventilation. Ces travaux ont également mis en évidence, sur les configurations de référence choisies, des possibilités d'inversion de sens d'air au niveau des fuites entre locaux, mais aussi avec l'extérieur, confirmant l'intérêt de s'interroger, de manière quantitative, sur l'effet du vent sur le confinement des substances radioactives, lors des expertises de sûreté.

4.7.3.3. État des lieux des pratiques des exploitants

Les éléments présentés ci-après sont issus des informations fournies par les exploitants dans le cadre du groupe de travail « Vent et Neige ».

EDF

Sur le parc en exploitation, le confinement dynamique externe des bâtiments auxiliaires est garanti pour des vents dits « fréquents » (~30 km/h).

Le confinement dynamique interne est peu sensible aux effets du vent (Hauteur Manométrique Totale des ventilateurs > aux pressions dynamiques générés par le vent et raccordement des ventilateurs à la cheminée)

En complément :

- l'impact du vent est non significatif sur le confinement statique des enceintes simples ;
- pour les réacteurs à doubles enceintes, la valeur de la dépression est optimisée pour limiter les rejets en situation accidentelle ;
- sur les REP, il n'est pas considéré de contamination volumique des locaux en fonctionnement normal (pas de processus avec risque de dissémination) ;
- le cumul d'une situation accidentelle (incidentelle) et de l'agression grand vent n'est pas considéré.

⁶⁴ [Système de logiciels de calcul Sylvia \(irsn.fr\)](http://système.de.logiciels.de.calcul.Sylvia.irsn.fr) pour l'étude de la ventilation de l'incendie et de l'aérocontamination.

ANDRA

Pour le CSM, le fonctionnement de la ventilation n'est pas requis en situations de grands vents. Son exploitation relève du fonctionnement normal dans la mesure où elle n'est requise que pour permettre la réalisation ponctuelle d'activités dans les locaux à risque radon.

Pour le CSA, le risque de perte du confinement dynamique en situations de grands vents sera pris en compte dans le cadre du prochain réexamen de sûreté.

Pour Cigéo, des exigences de conception ont été assignées au réseau de ventilation nucléaire afin qu'il tienne aux effets de pression générée par la tornade (qui couvrent les effets de pression générés par un grand vent) et afin de maintenir leur fonctionnalité sous l'effet de la tornade de référence. Toutefois, en cas de perte du confinement dynamique, les fonctions d'évacuation de la puissance thermique issue des substances radioactives et d'évacuation des gaz de radiolyse ne seraient pas remises en cause compte tenu des délais d'atteinte des conditions inacceptables.

ORANO

Le risque de perturbation de la ventilation (cascades de dépression non conformes aux plages prévues, référence de la pression atmosphérique défectueuse...) est identifié par ORANO dans le référentiel d'exploitation du site de La Hague. Les dispositions sont précisées au niveau des ateliers, en fonction des spécificités de la ventilation et de l'impact sur la sûreté des installations : surveillance du fonctionnement de la ventilation, application si nécessaire des « conduites à tenir » en cas de dysfonctionnement de la ventilation des bâtiments ou entreposages.

FRAMATOME

Les rafales de vent peuvent perturber la mesure de la pression de la ligne de référence, sur laquelle est calée la cascade de dépression qui assure le confinement dynamique. En effet, les rafales génèrent des variations rapides de pression et les ventilateurs ont des difficultés à établir une cascade de dépression stable.

La perte du confinement dynamique conduit à une mise à l'arrêt des équipements, mais l'installation reste dans un état sûr.

CEA

Les dispositions constructives vis-à-vis de la perturbation de la ventilation relative au confinement dynamique sont les suivantes :

- construction du génie civil avec une étanchéité soignée du confinement statique pour réduire les effets du vent sur les différences de pression du bâtiment (phénomènes de surpression sur les parois face au vent et en dépression pour les parois sous le vent) ;
- réduction des ouvertures vers l'extérieur,
- critère d'étanchéité minimum pour les ouvrants donnant sur l'extérieur (classement des ouvrants selon leur perméabilité à l'air) ;
- conception des installations en « poupées russes » avec positionnement des locaux et équipements à risque au centre du bâtiment et disposition de couloirs de circulation en périphérie pour atténuer les effets du vent sur les cascades de dépressions ;
- mise en œuvre de pans inclinés en partie haute des cheminées de fort diamètre,
- mise en œuvre de prises d'air neuf omnidirectionnelles ou en dehors des axes des vents dominants,
- positionnement des amenées d'air en fonction des vents dominants,
- calcul de tenue mécanique des gaines et équipements extérieurs sous grands vents.

4.7.4. Synthèse et préconisations

Le vent et les projectiles générés par le vent peuvent avoir plusieurs effets sur les systèmes de ventilation : risque de survitesse des ventilateurs, obturation des grilles de ventilation, dégradation ou perte du confinement dynamique. Ces différents effets devraient être étudiés dans la démonstration de sûreté des installations lors de la prise en compte de l'agression "Grands Vents" en accord avec les objectifs de sûreté visés pour l'installation.

Le risque de survitesse peut être écarté pour certaines technologies/familles de ventilateurs : technologie centrifuge. Pour les ventilateurs pour lesquels le risque de survitesse ne peut pas être écartée (ventilateurs axiaux par exemple), des exigences de la conception, de construction et d'exploitation devraient être définies.

4.8. Autres effets (MDTE, isolement du site...)

Les éléments présentés ci-après concernant l'état des lieux de pratiques des exploitants sont issus des informations fournies par les exploitants dans le cadre du groupe de travail « Vent et Neige ».

4.8.1. Manque de tension externe

4.8.1.1. Description

Les grands vents, en cas de tempête notamment, sont susceptibles d'endommager les équipements du réseau électrique et de générer un manque de tension externe.

4.8.1.2. État des lieux des pratiques des exploitants

EDF

Le cumul avec un manque de tension externe (MDTE) « matériel » est considéré pour le référentiel des agressions Projectiles Générés par le Grand Vent. Le MDTE « matériel » est défini comme la défaillance d'un ou plusieurs ouvrages constituant la liaison entre le site et le réseau alimenté par les autres moyens de production (ex : pylônes, transformateurs). Ce MDTE prend fin après réparation. La durée du MDTE considéré est de 5 jours (délai considéré pour la remise à disposition du réseau par RTE).

ANDRA

La prise en compte du cumul « Grands Vents + MDTE » diffère selon les installations de l'ANDRA.

Au CSM, l'alimentation électrique normale et secourue vise avant tout à faciliter l'exploitation quotidienne de l'installation. La démonstration de sûreté associée à la phase de démantèlement-fermeture ne valorise aucun élément actif. Une situation de MDTE est donc sans conséquence vis-à-vis de la protection des intérêts compte tenue de la configuration passive de l'installation et des dispositions prévues.

Pour le CSA, la perte de l'alimentation électrique en situation de grands vents n'entraîne aucun impact radiologique sur le centre, ni d'effet falaise.

Pour Cigéo, en cas de perte du réseau RTE ou de l'intégralité du poste de transformation et de distribution 90/20 kV, la mise en place d'une architecture électrique associant des groupes électrogènes de secours et des alimentations sans interruption (ASI) permet de maintenir l'alimentation électrique des différents récepteurs secourus de l'installation. Les centrales de secours sont dimensionnées pour résister aux effets de la tornade (exigence de maintien de l'intégrité du génie civile et cuves et canalisation d'alimentation des générateurs électriques, moyens de distribution d'électricité enterrés).

ORANO

De façon générale, les risques associés aux conditions météorologiques sont identifiés dans le référentiel d'exploitation au travers d'une consigne générale. Cette consigne générale est déclinée en tant que de besoin et de manière plus spécifique au niveau de chaque atelier ou groupe d'ateliers et/ou par risque (grands vents, neige...), par le biais de procédures, fiches réflexes... A ce titre, la perte du réseau électrique (RTE) et un défaut d'alimentation électrique est explicitement identifié par ORANO La Hague comme un risque potentiellement lié aux vents violents.

FRAMATOME

D'une manière générale, la perte d'alimentation électrique du réseau externe (réseau EDF « normal ») entraîne l'arrêt de la production et la mise en état sûr des équipements. L'alimentation électrique des équipements nécessaires pour maintenir les surveillances gaz, incendie, radioprotection et séisme est assurée par le réseau "permanent" puis par le réseau "secouru".

La perte totale d'alimentation électrique engendre la mise en état sûr des installations et ne constitue pas pour autant à elle seule une situation incidentelle.

CEA

De façon générale, la description des installations électriques et les dispositions adoptées face aux aléas climatiques permettant d'assurer la fiabilité du réseau électrique sont décrites dans la Présentation Générale de la Sûreté de l'Etablissement (PGSE) de chaque site CEA. La perte de l'alimentation électrique externe induite lors de l'endommagement des équipements du réseau électrique sous conditions climatiques extrêmes est considérée sur les installations du CEA. L'analyse de la perte des alimentations électriques et du réseau normal est considérée comme un risque en soit. Lorsque ce risque est induit par un autre risque, un renvoi à cette analyse est effectué. Cette analyse peut amener à installer des moyens fixes et/ou mobiles de groupe électrogène permettant de réalimenter les équipements appropriés. Les pertes électriques sont gérées par la conduite à tenir en cas de perte d'alimentation.

4.8.1.3. Synthèse/Préconisation

Le recensement de l'état des pratiques actuelles des exploitants montre une approche commune de prise en compte du risque de perte d'alimentation électrique du réseau externe en cas de grands vents.

Les grands vents, en cas de tempête notamment, sont susceptibles d'endommager les équipements du réseau électrique et de générer un manque de tension externe. Compte tenu de cette dépendance, le cumul d'un manque de tension externe avec l'aléa vent est à étudier dans la démonstration de sûreté des installations.

4.8.2. Isolement du site

4.8.2.1. Description

Les grands vents, en cas de tempête notamment, sont susceptibles d'endommager différentes infrastructures (coupure des routes dues à des chutes d'arbre...), pouvant empêcher les accès aux installations nucléaires de base.

4.8.2.2. État des lieux des pratiques des exploitants

EDF

Ce risque n'est pas traité dans le cadre de la démonstration de sûreté.

Cependant, la Règle Particulière de Conduite (RPC) « Événement météorologiques sévère » prescrit les règles à respecter sur le site en cas de prévision et survenue d'un aléa météorologique sévère. Elle intègre le REX national et international concernant les épisodes de grand vent. La RPC contient donc sous forme de recommandations

l'ensemble des dispositions à prendre en compte en cas d'isolement de site et aucun critère déclenchant la mise en œuvre de ces dispositions n'est défini.

EDF considère que l'autonomie du site est à assurer pendant une durée de 24 h et que passé cette durée, l'accès sur site sera soit rétabli soit possible pour des ressources spécifiquement équipées.

La RPC définit les conditions d'entrée et de sortie des différentes phases : veilles, vigilance, pré-alerte, alerte et retour à la normale.

Durant la phase de veille, l'exploitant s'organise dans le but d'anticiper l'isolement du CNPE afin de disposer de toutes les ressources humaines et matérielles en cas d'isolement du site. Cela se traduit notamment par le choix des lieux de vie, l'approvisionnement de ressources en quantité suffisante pour permettre la restauration le repos et l'hygiène et par la définition d'un plan de circulation interne au CNPE.

Durant la phase de pré-alerte (12 h avant le début prévisionnel de l'évènement météorologiques), l'astreinte de direction prévoit de mobiliser ou non les agents indispensables à l'exploitation des tranches. Elle évacue le personnel non nécessaire à l'exploitation de la tranche. Elle contacte l'interlocuteur en charge de la restauration pour lui demander de mobiliser son personnel.

En cas de mobilisation des astreintes, il est nécessaire de s'assurer auprès des agents de leur arrivée avant le début d'isolement prévu, de mobiliser les moyens et le personnel pour assurer la disponibilité des lieux de vie.

Il n'existe aucun critère préétabli qui déclenche un PUI SACA (Plan d'Urgence Interne Sûreté Aléas Climatiques et Assimilés) en cas d'isolement de site consécutif à un épisode de vent. Il existe un critère dit filet qui permet au site de déclencher un PUI SACA s'il estime que la situation le nécessite. Ce critère ne relève pas spécifiquement de l'isolement de site suite à un cas de vent.

ANDRA

En cas de conditions de vents extrêmes et tornades, les procédés sont arrêtés. Il n'est donc pas nécessaire d'envisager des dispositions permettant d'assurer une permanence sur des procédés en cours.

ORANO

La détérioration des conditions de travail et d'accès n'est pas explicitement mentionnée en cas de vents violents, mais les dispositions d'organisation retenues en cas d'évènement neigeux (§ 5.7.2), notamment en gestion de crise, peuvent servir de base le cas échéant.

FRAMATOME

Le Poste de Commandement de Crise (PCC) permet d'être autonome pendant 48 h. Passé ce délai, FRAMATOME considère que les accès au site seront rétablis.

CEA

Le CEA n'a pas apporté d'élément au sein du groupe de travail concernant les pratiques mises en œuvre sur ses installations vis-à-vis de la problématique d'isolement de site en cas de grands vents.

4.8.2.3. Lien avec l'organisation des pouvoirs publics

EDF

L'isolement de site est une situation interne au CNPE. En l'absence de situations accidentelles (déclenchement d'un PUI), aucune disposition particulière n'est mise en place par les pouvoirs publics pour débayer les voies d'accès et rétablir l'accès au CNPE. L'intervention des pouvoirs publics sera faite en fonction des disponibilités du personnel et des matériels.

Aucune convention n'est signée entre les pouvoirs publics et les CNPE en cas d'isolement de site. Cela relève d'une responsabilité de l'exploitant sans impact sur la population.

L'ANDRA, ORANO, le CEA et FRAMATOME n'ont pas apporté d'éléments au sein du groupe de travail concernant les pratiques mises en œuvre sur leurs installations vis-à-vis des liens mis en œuvre avec l'organisation des pouvoirs publics en cas d'isolement du site suite à des grands vents.

4.8.2.4. Synthèse/Préconisation

Les vents violents étant susceptibles d'endommager différentes infrastructures (coupure des routes due à des chutes d'arbre...) et de rendre impossible momentanément les accès aux installations nucléaires de base, l'éventualité d'un isolement du site est à prendre en compte dans la gestion de la situation de vents extrêmes. La question de l'organisation avec les pouvoirs publics (mise en place de convention éventuelle...) devrait également être prise en compte.

4.8.3. Perte de la source froide

4.8.3.1. Description

Un réacteur nucléaire nécessite une source froide pour son fonctionnement (à la fois pour la production et pour la sûreté). Cette source froide est assurée par un prélèvement d'eau dans le milieu naturel (mer ou rivière) au niveau des stations de pompage assurant une fonction de transit de l'eau brute et une fonction de filtration.

Le vent est susceptible d'engendrer et de déplacer différents types d'objets (troncs d'arbres, branches, feuilles...) susceptibles de se retrouver en grande quantité dans la source froide. Le vent peut donc entraîner des arrivées massives de colmatants au niveau des stations de pompage des réacteurs nucléaires. En situation extrême, l'évènement pourrait engendrer une perte de la source froide.

4.8.3.2. État des lieux des pratiques des exploitants

Pour les installations d'EDF et du CEA (pour lesquelles il y a un prélèvement d'eau en milieu naturel), la prise en compte des situations induites par le vent extrême (cumuls) est traitée via la protection des cibles potentielles. Un lien de cause à effet entre la présence de vent tempétueux (Grand Vent) et une arrivée massive de colmatants (AMC) est possible.

Dans le cas de la prise en compte du cumul « Grands Vents + AMC », EDF retient également un MDTE « matériel ». Un cumul d'un Grand Vent avec la perte de la source froide est également envisagé de façon conservatrice. Le cumul des projectiles générés par le grand vent (PGGV) et d'une AMC est également considéré par EDF à titre conservatif. Dans ce cas, un MDTE « matériel » doit être pris en compte.

Les installations des autres exploitants (ANDRA, FRAMATOME, ORANO) ne sont pas concernées par le risque de perte de la source froide.

4.8.3.3. Conclusion

Le vent est susceptible d'entraîner des arrivées massives de colmatants au niveau des stations de pompage, ce qui peut entraîner une perte de la source froide. Le risque de perte de la source froide du fait de l'arrivée massive de colmatants en cas de vent violent devrait être pris en compte dans la démonstration de sûreté.

4.8.4. Travaux en extérieur – Transports internes

4.8.4.1. Description

Outre les effets sur les structures des bâtiments et sur le bon fonctionnement des fonctions de sûreté qu'ils abritent, le vent nécessite d'être pris en compte à l'extérieur des bâtiments, que ce soit pour des travaux en extérieurs ou pour des transports sur site.

4.8.4.2. État des lieux des pratiques des exploitants

EDF

La Règle particulière de Conduite « Evènement Météorologique Sévère » recommande à l'entrée en phase pré-alerte (24 heures avant l'arrivée d'un évènement identifié « Alerte rouge Météo-France ») la mise en sécurité des chantiers extérieurs en cours (notamment les travaux en hauteur, les opérations de levage et manutention, les tirs radiologiques), le report des opérations de livraison ou évacuation du combustible, les opérations de manutention combustible, la limitation de la sollicitation des portes d'accès des bâtiments vers l'extérieur, la fermeture du tampon matériel du BR des tranches en arrêt.

Certains sites vont au-delà en contraignant le déroulement de chantier extérieur pour la protection du personnel. Sur les CNPE de Paluel et Flamanville, les dispositions et interdictions suivantes sont mises en œuvre :

- à partir de 50 km/h en vitesse moyenne : pas d'utilisation des moyens de levage sans rédaction d'une analyse de risque spécifique ;
- à partir de 70 km/h en vitesse moyenne : Les grues tour sont mises en girouette. Pas de travaux en hauteur (échafaudage, plate-forme, toiture) en extérieur. Pas d'utilisation des moyens de levage y compris à l'aide de chariots autoportés sans rédaction d'une analyse de risque spécifique ;
- à partir de 90 km/h en vitesse moyenne : les chantiers sont mis en sécurité et arrêtés. Les déplacements extérieurs sont réduits au strict nécessaire ;
- à partir de 110 km/h, il est interdit de se déplacer à l'extérieur des bâtiments.

L'information du personnel et le dispositif d'alerte associé est assurée par la protection de site.

ANDRA

Les RGE précisent différentes exigences d'exploitation en fonction de l'installation considérée en lien avec les phases de vie de l'INB :

Pour le Centre de stockage de la Manche, des consignes sont données afin de limiter la circulation et le déplacement (et précise en cas de déplacement nécessaire, le chemin à suivre), et invite le personnel présent à rester sous abri. En cas de travaux extérieurs en hauteur lors de vent, les chantiers sont interrompus et mis en sécurité (rangement des matériels susceptibles d'être transportés par le vent).

Pour Centre de stockage de l'Aube, des exigences sont associées aux activités de manutention en cas de vent, à savoir :

- en cas de vent supérieur à 90 km/h, la manutention des colis dans les ouvrages est interdite ;
- en cas de vent supérieur à 60 km/h, le déplacement d'une charpente mobile d'un ouvrage à l'autre est interdit.

Pour ce qui concerne le projet CIGEO, les opérations réalisées dans les bâtiments sont arrêtées. Les colis manutentionnés sont affalés.

ORANO

Les risques liés aux travaux en extérieur (notamment en hauteur), aux manutentions (parcs d'entreposage) et aux transports internes (de personnel ou marchandises dangereuses) sont pris en compte en cas de vents violents dans les référentiels d'exploitation d'ORANO : les travaux extérieurs sont sécurisés, interrompus ou interdits (en fonction des conditions spécifiques à ces travaux), les déplacements sont le cas échéant limités et les transports internes de substances radioactives suspendus.

Les risques liés à une chute de grue (ou d'une nacelle) d'un chantier sont pris en compte en sécurisant la configuration en cas d'alerte de grand vent, conformément aux dispositions usuelles pour ce type d'équipement. Il n'est pas demandé dans les « conduites à tenir » d'exploitation d'arrêter les travaux à l'intérieur des bâtiments ou les manutentions ou de mettre les ponts en position sûre ; les dispositions concernent les terrasses et l'extérieur des bâtiments. Néanmoins, en cas de grand vent (défini à la Hague comme > 130 km/h par exemple)

les possibles perturbations de ventilation conduisent à analyser les opérations concernées (ouverture de garage-pont) avant de les entreprendre (ex. ouverture garage ponts). Pour les chantiers clos et indépendants, des dispositions spécifiques peuvent être retenues.

FRAMATOME

En cas d'alerte orange 'vent violent' de la part de Météo-France, les travaux en toiture sont interdits. En cas d'alerte rouge 'vent violent' ou 'grand froid', le transport et la manutention de matière dangereuse sur site sont interdits. Cela est notamment formalisé dans les procédures de type 'conduite à tenir'.

CEA

Le CEA n'a pas apporté d'élément au sein du groupe de travail concernant les pratiques mises en œuvre sur ses installations vis-à-vis de la problématique des travaux en extérieur et des transports internes en cas de vents violents.

4.8.4.3. Synthèse/Préconisation

Les risques liés aux travaux en extérieur, aux manutentions et aux transports internes devraient être pris en compte en cas de vents violents. L'objectif est de garantir la sécurité des personnes mais également de prévenir le risque de collision ou de chute de charge qui pourrait être indirectement générée par un grand vent.

4.9. Spécificité des rafales convectives

Les phénomènes de rafales convectives et en particulier de rafales descendantes sont présentés dans le § 2.1 « Phénomènes et données disponibles ». L'Eurocode 1-4 sur le vent ne traitant pas des tornades ni de ce type de phénomènes, le GT a tracé dans cette partie les éléments recensés concernant la caractérisation de ce phénomène ainsi que les effets sur les structures et équipements.

Cette partie est principalement issue d'échange entre l'IRSN et Keraunos, complétée par des informations tracées lors des réunions du GT et un recensement succinct des pratiques internationales dans le domaine du nucléaire.

4.9.1. Caractérisation du phénomène

En France, Keraunos recense les événements convectifs majeurs et les caractérise à partir des dommages observés. Keraunos s'appuie sur les dommages observés et relayés par les médias, les réseaux sociaux, les témoignages et les mesures directement enregistrées par le réseau de Météo-France pour identifier les événements exceptionnels. Keraunos distingue dans ses recensements les rafales convectives classiques, de leurs variantes microrafales et macrorafales. Néanmoins l'ensemble de ces rafales peut être analysé conjointement dans le cadre d'une étude sur les rafales convectives.

Les premières rafales recensées par Keraunos remontent au XIX^{ème} siècle mais le recueil des événements est très partiel avant 2010-2015. Le graphe ci-dessous indique le nombre de rafales convectives recensées depuis 1999.

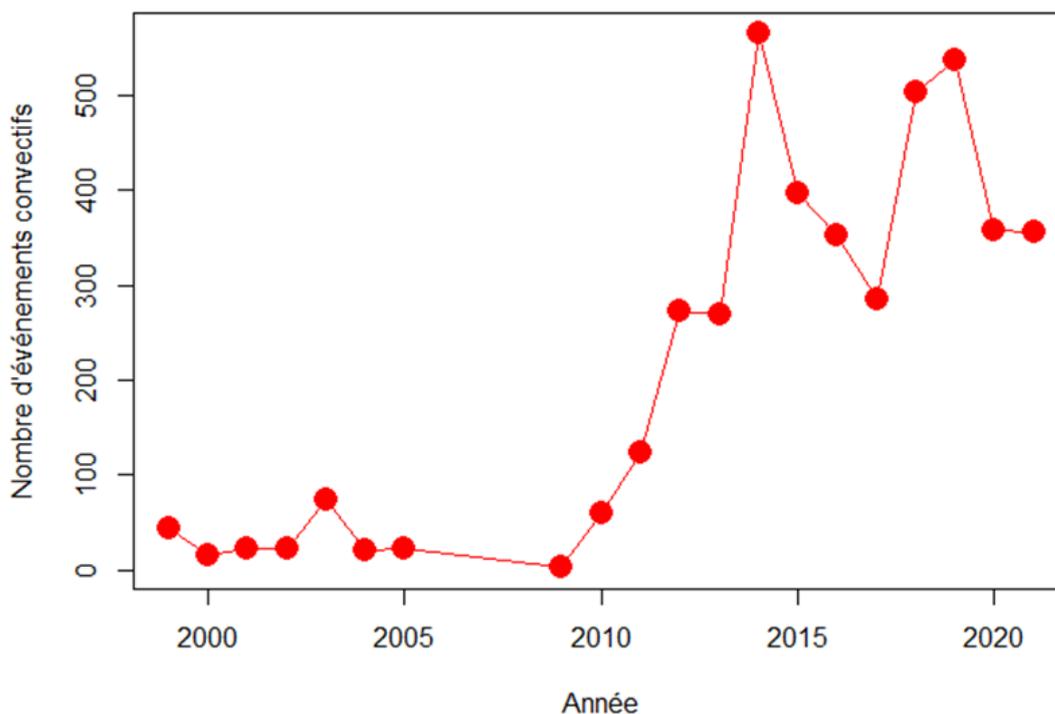


Figure 37 : Evolution du nombre annuel d'événements convectifs récentes par Keraunos depuis 1999

Les zones touchées par les phénomènes convectifs :

Les très fortes rafales convectives sont liées à la présence d'air sec dans les étages moyens de l'atmosphère. Ainsi, la zone Nord-Est de la France est propice aux phénomènes convectifs venteux, car elle se situe périodiquement au carrefour entre de forts vents de sud secs en sortie de vallée du Rhône, et une masse d'air plus humide venant de l'ouest. Cependant, des épisodes orageux très venteux se produisent également parfois sur d'autres zones du territoire (de même des épisodes de galerne⁶⁵ peuvent survenir dans l'extrême sud-ouest).

Estimation de la vitesse du vent

Les vitesses de vent des tornades et des rafales convectives sont estimées sur la base des dégâts observés (et avec l'échelle de Fujita améliorée pour ce qui concerne spécifiquement les tornades). Une fourchette de vitesses de vent est ainsi établie à partir de plusieurs points d'observations sur une même zone.

La plus grande extension spatiale des rafales convectives a été observée dans les Vosges le 11 juillet 1984 où tout un village a été touché et de nombreuses autres communes touchées.

Les coordonnées disponibles pour localiser les rafales sont celles de la commune correspondante (code INSEE). Lorsque plusieurs évènements sont disponibles pour un même code INSEE, seul le plus important a été conservé. La carte ci-dessous permet de représenter l'ensemble des rafales convectives les plus élevées estimées par Keraunos sur le territoire métropolitain.

⁶⁵ La galerne est un vent de nord-ouest froid et humide qui souffle en rafale sur l'ouest de la France, notamment en Touraine, dans le Berry, les Deux-Sèvres, la Vendée, au Pays basque, le Quercy et la Bretagne généralement au printemps et en automne.

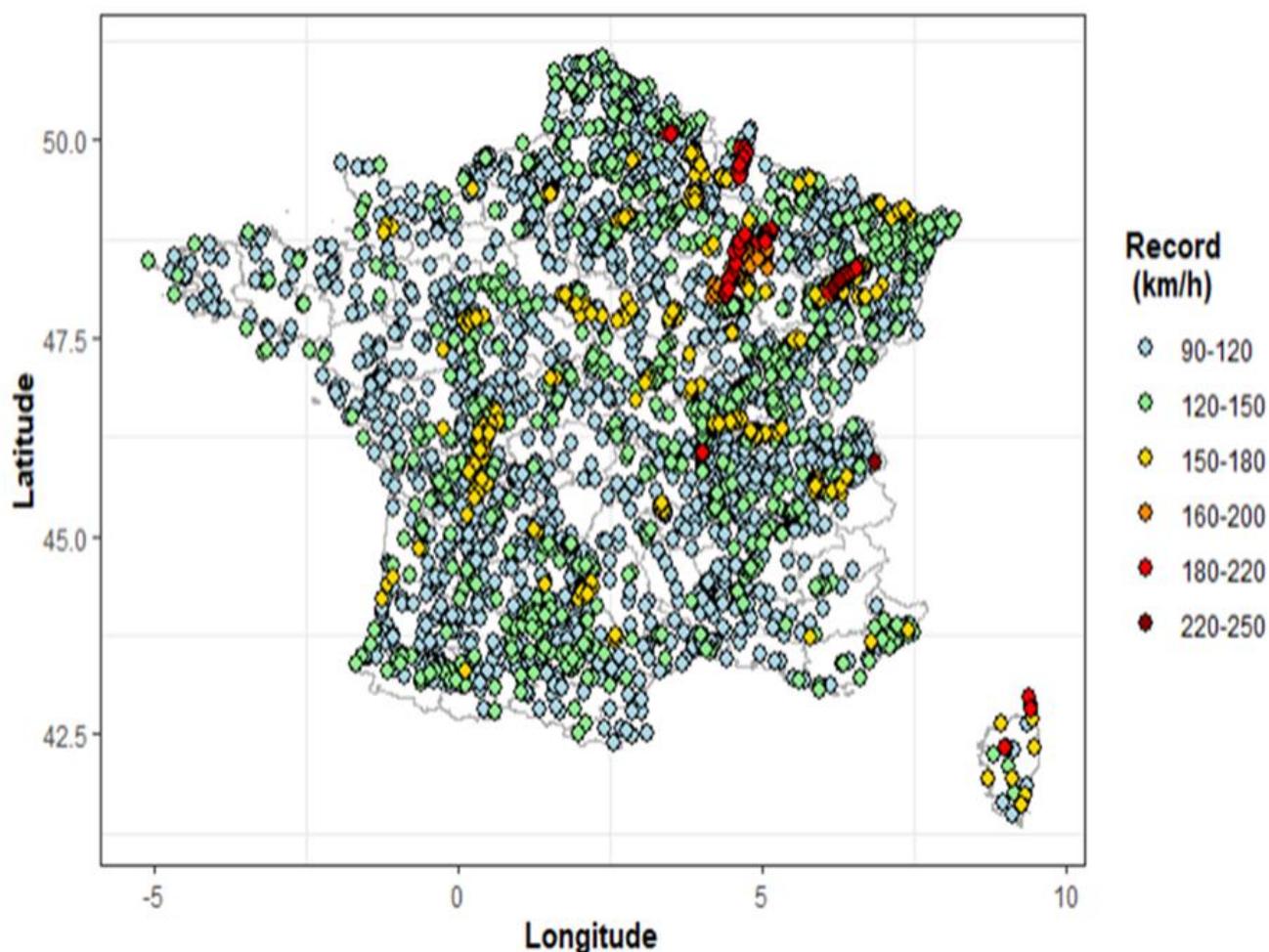


Figure 38 : Carte des rafales convectives les plus élevées estimées par Keraunos et mesurées⁶⁶ sur la période 1862-2021.

L'exploitation des données Keraunos permet de recenser les événements les plus importants, notamment 7 journées ayant conduit à des vents estimés ou mesurés dans les gammes 180-220 et 220-250 km/h, avec un nombre de communes très variable allant jusqu'à 40 communes touchées le 29 avril 2018. Les départements touchés ont été les suivants : Haute-Savoie le 7/03/2019, Vosges le 11/07/1984, Corse le 22/12/2019, Loire le 16/08/2003, Nord le 27/07/2013, Var, Tarn et Garonne, Vaucluse, Aube, Vendée, Marne et Somme le 29/04/2018, Marne et Meuse le 16/09/2015⁶⁷.

Compte tenu de la disparité dans le temps du nombre de commune recensées comme ayant été touchées par une rafale convective et de l'absence d'information sur la surface de la zone touchée, il n'est pas possible de caractériser une probabilité de survenue en un endroit donné par un calcul du type de celui que l'on fait pour les tornades.

La carte ci-après a été réalisée par Keraunos sur la base des observations disponibles. Le calcul d'exposition est associé à un rayon de 30 km car il n'y a pas suffisamment d'événements répertoriés pour travailler à l'échelle de

⁶⁶ Les vitesses mesurées de rafales convectives sont issues de la base de données de Keraunos et ont été mesurées par le réseau de mesure Météo-France. Les valeurs mesurées ont été réparties sur les gammes de mesure suivantes : 90-120, 120-150, 150-180, 180-200 et 220-250 en cohérence avec les gammes définies par Keraunos pour estimer les vitesses de rafale. Seule la gamme 160-200 n'a pas été utilisée. Pour une meilleure visibilité, les vitesses inférieures à 90 km ne figurent pas dans la carte.

⁶⁷ Comme indiqué au § 2.1.3, l'épisode orageux qui a atteint la Corse le 18 août 2022 (225 km/h mesuré à la station de Marignana) apparaît comme un épisode record au niveau métropolitain qui sera intégré dans la base de données Keraunos.

la commune. Keraunos réalise donc classiquement ce type d'analyse à l'échelle des plus grosses cellules orageuses possibles, et non à une échelle ultrafine qui pourrait donner l'illusion d'axes étroits à risque élevé jouxtant des zones apparemment peu exposées. Dans la mesure où l'unité cellulaire orageuse la plus large est la supercellule, dont le diamètre peut atteindre 20 à 30 km, Keraunos travaille habituellement à cette échelle de 30 km. Cela permet de considérer qu'un événement répertorié à un endroit quelconque aurait pu se produire ailleurs dans un rayon de 30 km, compte tenu des capacités d'extension maximale d'une cellule orageuse unique. Les résultats en termes d'analyse du risque sont plus lissés, mais sans aucun doute plus conformes à la réalité.

Keraunos rappelle que les effets de relief ne sont pas prépondérants, les rafales convectives peuvent se produire n'importe où au passage d'un système orageux.

Cette carte ne permet pas facilement de traduire les valeurs en probabilité de survenue annuelle pour une installation mais elle confirme les indications données par Keraunos concernant les zones de survenues privilégiées.

Exposition au risque de rafales convectives

Seuil : > 150 km/h

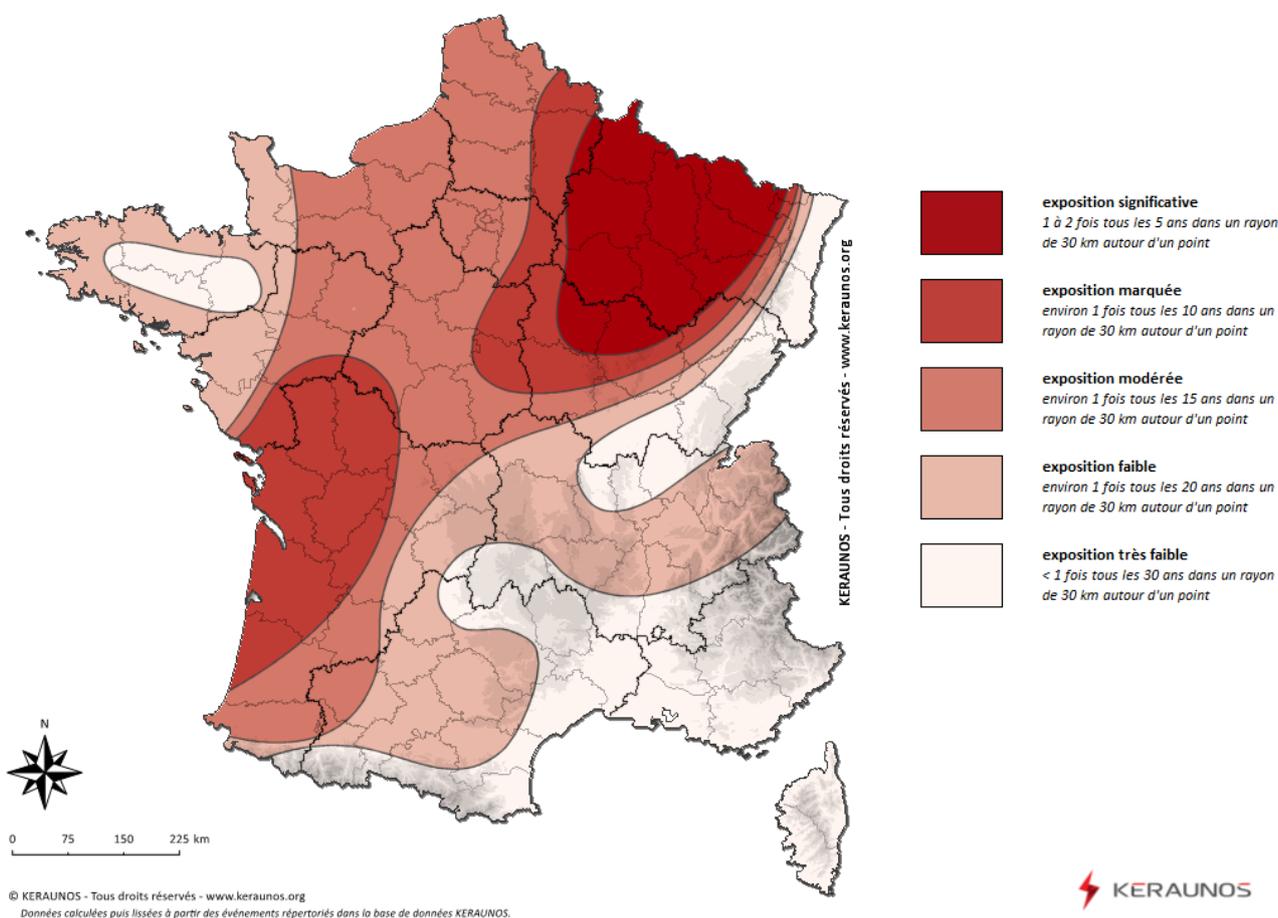


Figure 39 : Carte d'exposition au risque de rafale convective – Keraunos, mai 2022

4.9.2. Spécificité des rafales convectives sur les bâtiments et structures

La particularité des rafales convectives est leur composante verticale sur 2-3 km d'altitude maximale, qui génère des effets d'écrasement qui peuvent impacter les toitures. Ce phénomène est très différent des rafales de tempêtes, bien que la convection soit possible au sein d'une tempête.

La rugosité du sol impacte peu ou pas les rafales convectives. A vitesse de vent équivalente, beaucoup plus de dégâts sont constatés pour une rafale convective que pour le vent dépressionnaire.

La rafale et la tornade ont des points communs : des bâtiments et des maisons peuvent être extrêmement endommagés, avec des dégâts très ressemblants entre eux. Les maisons récentes résistent mieux aux effets d'écrasement par les rafales convectives que les toitures anciennes. Des dégâts sont rarement observés sur les immeubles ou les toitures plates.

Le phénomène des rafales convectives est cependant différent de celui des tornades, qui est caractérisée par un effet d'aspiration très net et une dispersion des projectiles dans toutes les directions. Les phénomènes de tornade se produisent sur un couloir étroit alors que les rafales convectives peuvent se propager sur des couloirs larges de plusieurs kilomètres et longs de plusieurs centaines de kilomètres dans les cas extrêmes.

En termes de risques associés à des projectiles, les projectiles tornades apparaissent plus importants que ceux des rafales convectives d'après Keraunos.

L'Eurocode ne traite pas spécifiquement des rafales descendantes mais une partie des observations de rafales de vent convectifs est captée par les observations aux stations Météo-France.

4.9.3. Pratiques internationales

Les études internationales recensées concernent principalement l'Australie et la nouvelle Zélande et n'ont pas permis d'identifier une approche globale applicable en France. Les deux manques principaux concernent d'une part la caractérisation de l'aléa, l'exhaustivité des données n'étant pas assurée et d'autre part, la caractérisation des effets sur les structures, notamment l'évaluation de la turbulence à considérer dans les calculs dynamiques pour laquelle il manque une démarche de calcul des effets opérationnelle et éprouvée.

4.9.4. Conclusion

Le GT constate l'absence d'approche opérationnelle pour caractériser les rafales convectives, en particulier les rafales descendantes. Le GT relève que les vitesses des rafales convectives peuvent dépasser les 180 km/h.

Le GT considère que les effets des rafales convectives sont en grande partie couverts par les dispositions de protections ou de vérifications retenues au titre des agressions vent dépressionnaire et tornades (tornades de niveau minimal EF2 - 200km/h [21]).

A ce stade, le GT ne propose pas de définir de situation de référence spécifique au phénomène de rafale convective. Néanmoins, pour les sites nucléaires situées à proximité de zones dans lesquelles des rafales convectives ont été observées, le GT préconise de vérifier que les vitesses de vent de référence WENRA couvrent bien, en vitesses de pointe associées, les vitesses des rafales convectives maximales estimées ou observées.

Le GT souligne l'importance de poursuivre le travail de recensement et de compréhension des spécificités des caractéristiques des rafales convectives et de leurs effets sur les installations nucléaires.

5. NEIGE : CARACTERISATION DE L'ALEA ET EFFETS

Cette partie expose successivement les pratiques et les connaissances associées à l'évaluation des niveaux de neige extrêmes par les approches statistiques (§ 5.1), la démarche retenue par l'Eurocode 1-3 pour déterminer des charges de neige sur le sol (§ 5.2) et les travaux opérationnels et de recherche à partir de simulations climatiques (§ 5.3) avant de synthétiser les différentes options possibles pour atteindre la cible WENRA et de présenter les préconisations du GT (§ 5.4). Les effets de la neige sur les structures sont ensuite présentés (§ 5.5) ainsi que les effets d'obstruction (§5.6) et les autres effets (§ 5.7). La dernière partie présente des préconisations complémentaires du GT compte tenu des accumulations possibles de la neige (§ 5.8).

Pour rappel, les éléments précédemment présentés en partie 2 « Phénomènes et données » du rapport ont permis de présenter le phénomène et de recenser les sources des données disponibles, qui peuvent être des données d'observations – principalement des hauteurs de neige mesurées - mais aussi de réanalyse ou de simulation (cf. § 2.2.4).

Dans cette partie, l'usage du terme Eurocode renvoie à l'Eurocode 1-3 qui concerne la neige.

5.1. Traitement statistique pour la neige

Cette partie présente quelques éléments généraux sur les méthodes statistiques d'évaluation des valeurs extrêmes qui complètent les éléments généraux décrits en partie 4.1 pour le vent, en traitant plus particulièrement les problématiques spécifiques de traitement statistique des données de neige en plaine. Elle a été rédigée par l'INRAE, relue et commentée par les membres du GT.

L'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes en hydrométéorologie (crue, pluie, neige, précipitation totale), a fait l'objet d'un grand nombre de publications depuis le début du vingtième siècle, soulignant bien la difficulté et la grande variété des approches possibles. Le choix de la distribution, la méthode d'inférence, les données possiblement exploitées, sont quelques exemples de problématiques avec de nombreuses solutions possibles. La théorie des valeurs extrêmes [42] a permis d'apporter un socle théorique solide n'empêchant pas certaines limites, notamment sur son utilité en extrapolation, c'est-à-dire pour l'estimation de niveaux de retour exceptionnels ([89],[90]).

Difficultés liées aux observations de neige en plaine

En France, dans les régions de basse altitude, les épisodes de neige sont relativement rares. En plaine, le pourcentage d'années sans épisode de neige est important, ce qui pose un problème méthodologique pour l'analyse fréquentielle des « extrêmes » au sens statistique, c'est-à-dire les maxima par bloc ou les excès de seuil [42]. Pour les régions où ces épisodes sont très occasionnels, le nombre de jours avec des intensités positives de neige est faible et ne correspond pas au cadre de la théorie des valeurs extrêmes où on suppose qu'on peut extraire un échantillon d'une taille suffisante en sélectionnant, par exemple, les maxima annuels. Dans ce cas, les distributions issues de la théorie des valeurs extrêmes ne sont pas théoriquement adaptées. De plus, si le nombre d'intensités positives est faible sur toute la chronique d'observations, l'ajustement de la distribution sera très incertain et limité pour l'extrapolation et le calcul de niveaux de retour [14] [95].

A cette difficulté théorique, s'ajoute une difficulté pratique à mener des extrapolations statistiques sur un certain nombre de séries d'observations comportant des valeurs exceptionnelles. Ces valeurs ne s'ajustent pas avec le reste de l'échantillon comme l'illustre la figure ci-dessous.

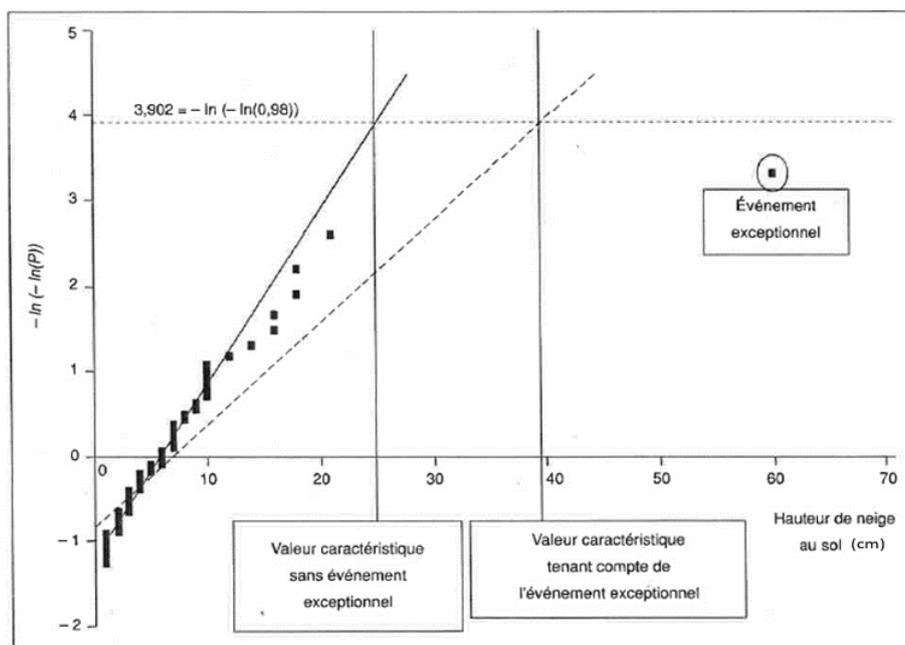


Figure 40 : Illustration de l'ajustement de lois de probabilités sur la distribution des valeurs extrêmes annuelles de la hauteur de neige au sol avec et sans chute exceptionnelle [96]

La présence d'une valeur exceptionnelle dans les séries d'observation a conduit par le passé le CSTB à mener des calculs statistiques en excluant ces valeurs, tout en les retenant de façon complémentaire, déterministe, au travers de valeurs exceptionnelles traitées spécifiquement dans les règles de dimensionnement des structures (cf. § 5.2).

Le document [97] précise (p30) que cette approche a été retenue pour les hauteurs de neige exceptionnelles vérifiant le critère suivant :

$$(H50X - H50) / H50X > 0,5 \quad \text{et} \quad H_{\max} > 1,50 H50$$

Avec :

- H50X la hauteur de neige de période de retour cinquantennale calculée en incluant la hauteur de neige maximum,
- H50 la hauteur de neige de période de retour cinquantennale calculée en excluant la hauteur de neige maximum,
- Hmax la hauteur de neige maximum,
- le coefficient 1,50 et un facteur déduit des règles de sûreté des codes français de dimensionnement des structures.

Dans les autres études identifiées par le GT, notamment celles menées par Météo-France, l'ensemble des données a été conservé. Néanmoins, pour certaines séries de hauteurs de neige, Météo-France opère des transformations de variable afin de respecter des valeurs de paramètres de formes comprises en [-0,4 et +0,4] (ajustement sur des valeurs racines ou logarithmes de la hauteur de neige, selon l'étude [34] de 2019).

Au niveau Européen, le rapport [14] de 2021 sur les actions climatiques prises en compte dans les Eurocodes présente quelques éléments de synthèse des pratiques actuelles (p 70 et suivantes), soulignant que de nombreux pays ont eu recours dans les années 2000 à la loi de Gumbel pour le calcul des charges de neige définies dans leurs annexes nationales. Le rapport relève cependant la forte influence du choix de la loi d'ajustement statistique sur les valeurs extrêmes calculées (exemple de l'Italie où les valeurs varient dans une gamme de -30 % à + 40 %).

Incorporation de données historiques

Pour les phénomènes naturels comme les crues ou les avalanches, différentes sources peuvent être exploitées pour accroître notre connaissance des événements extrêmes. Pour les crues, on peut citer entre autres l'analyse des laisses de crues, des sédiments déposés lors des grandes crues, des impacts sur les cernes des arbres (dendrochronologie). Pour les phénomènes ayant des impacts importants (nombre de décès, destruction des infrastructures), les rapports, témoignages, délibérations sont une source qui peut être exploitée (voir La Base de Données Historiques sur les Inondations, BDHI, <https://bdhi.developpement-durable.gouv.fr/welcome>). Pour les épisodes de neige, l'association Infoclimat fournit la base de données HistorIC (<https://www.infoclimat.fr/historic/>). Ces données historiques peuvent être exploitées afin d'ajuster les distributions de probabilité de manière plus robuste, et de nombreuses méthodes ont été proposées pour l'analyse fréquentielle des crues [91]. Le GT n'a pas identifié d'application de cette approche pour les extrêmes neigeux.

Régionalisation

Les méthodes de régionalisation (Regional frequency analysis, RFA) permettent également d'améliorer les ajustements des distributions, la prise en compte de l'information régionale consiste à remplacer le déficit en longueur de chronique d'observations par l'information disponible autour du point d'intérêt. Cette approche peut également être un moyen d'interpoler les distributions de valeurs extrêmes [92]. La stratégie de ces méthodes repose sur le concept de régions homogènes qui peuvent être fixées a priori ou en considérant des zones glissantes autour du site cible, par exemple avec un rayon d'une taille de quelques dizaines de kilomètres [93]. L'hypothèse principale est de considérer que, pour les différentes stations de la région homogène, les distributions sont équivalentes à un facteur d'échelle près. Des tests statistiques d'homogénéité peuvent éventuellement invalider cette hypothèse [63].

Prise en compte de la tendance liée au changement climatique par les modèles non-stationnaires

Il est possible d'utiliser des variantes non stationnaires du modèle GEV pour les maximums annuels afin de prendre en compte la tendance liée au changement climatique.

L'étude [94], menée sur la zone des Alpes pour la période 1959 à 2019, considère des paramètres de position et d'échelle variables dans le temps et un paramètre de forme stable. Dans ce cas, le modèle non stationnaire est sélectionné pour une grosse minorité des stations (22 %), avec des tendances généralement négatives en dessous de 900m. Des tendances positives sont cependant observées au sud à 600m.

A noter que la définition des niveaux de retour en non-stationnaire diffère de celle utilisée en stationnaire. L'étude [94] utilise un niveau de retour à 50 ans pour l'année t correspondant à la probabilité de dépassement de $1/50$ pour l'année t . Dans le cas d'un modèle non-stationnaire, le niveau de retour à 50 ans peut donc évoluer suivant t , ce qui n'est pas le cas en stationnaire.

Sachant qu'on ajuste un nombre plus important de paramètres sur le même nombre d'observations, un modèle non-stationnaire souffre de plus d'incertitudes liées au manque de données que son alternative stationnaire.

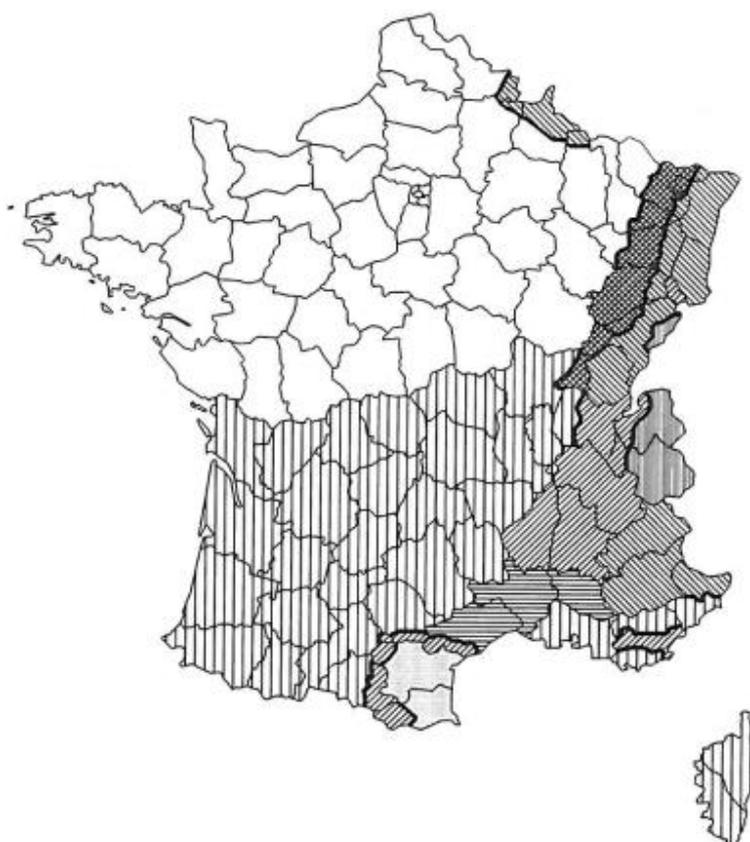
5.2. Approche retenue par l'Eurocode pour déterminer des charges de neige sur le sol

5.2.1. Carte des charges de neige au sol

L'Eurocode 1-3 et son annexe nationale ont pour objectif l'évaluation des charges de neige sur les constructions. Le calcul des charges de neige en toiture se fonde sur une charge de neige sur le sol caractéristique (S_k). L'annexe nationale spécifie les valeurs S_k à utiliser.

En cohérence avec l'approche retenue par le CSTB pour traiter les hauteurs de neige exceptionnelles (cf. § 5.1), la carte de l'annexe nationale distingue des zones pour lesquelles est définie, en plus d'une charge caractéristique sur le sol, une charge exceptionnelle de neige sur le sol.

**Carte des valeurs des charges de neige
à prendre en compte sur le territoire national**



Régions :	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Valeur caractéristique (S_k) de la charge de neige sur le sol à une altitude inférieure à 200 m :	0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,65	0,90	1,40
Valeur de calcul (S_{Ad}) de la charge exceptionnelle de neige sur le sol :	—	1,00	1,00	1,35	—	1,35	1,80	—
Loi de variation de la charge caractéristique pour une altitude supérieure à 200 :	Δs_1						Δs_2	

(charges en KN/m^2)

Altitude A	Δs_1	Δs_2
de 200 à 500 m	$A/1000 - 0,20$	$1,5 A/1000 - 0,30$
de 500 à 1000 m	$1,5 A/1000 - 0,45$	$3,5 A/1000 - 1,30$
de 1000 à 2000 m	$3,5 A/1000 - 2,45$	$7 A/1000 - 4,80$

Figure 41 : Carte des valeurs des charges de neige définies dans l'annexe nationale de l'Eurocode 1-3 (annexe normative)

L'Eurocode indique que « dans certains cas où des données plus précises sont nécessaires, la valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol peut être affinée à l'aide d'une analyse statistique appropriée de relevés sur longue période effectués dans une zone bien protégée proche du site considéré ».

En complément, l'annexe D de l'Eurocode présente un ajustement de la charge de neige sur le sol en fonction de la période de retour et du coefficient de variation de la charge de neige maximale annuelle (entre 0,2 et 0,6), la valeur centennale de charge de neige atteint environ 7 à 13 % de plus que la valeur cinquantiennale.

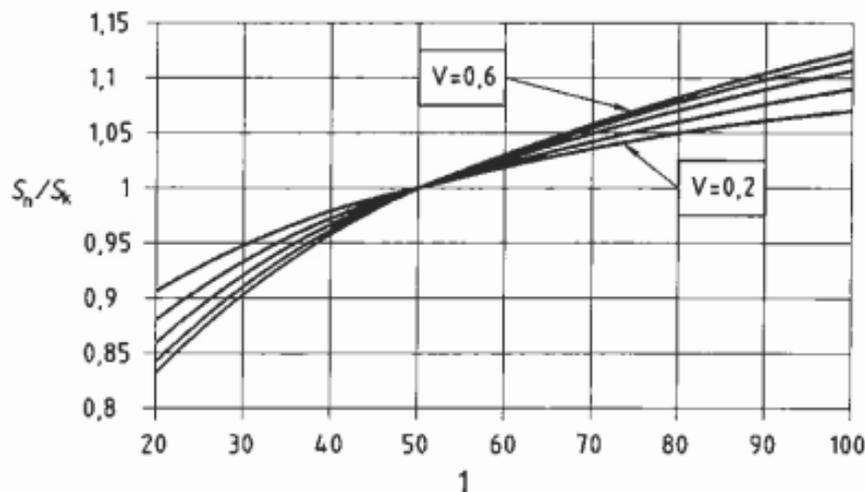


Figure 42 : Ajustement de la charge de neige sur le sol en fonction de la période de retour, issu de l'Eurocode 1-3 (annexe D informative)

Il est à noter que les valeurs de la carte Eurocode ne prennent pas en compte les prévisions des effets du changement climatique puisque les modèles utilisés sont stationnaires.

Il est à noter également que la clause 4.1(2) Note 1 de l'annexe nationale de l'Eurocode 1-3 spécifie qu'« il n'est pas permis d'utiliser une analyse statistique particulière pour fixer une valeur caractéristique de la charge de neige au sol inférieure à celle définie par la carte [nationale normative] ».

5.2.2. Information sur le poids volumique moyen de la neige

La carte de l'annexe nationale est exprimée en charge (en kN/m^2) mais a été établie à partir de mesure de hauteur de neige. L'annexe E de l'annexe nationale informe sur le poids volumique apparent de la neige qui est variable. En général, il augmente avec la durée de la couverture neigeuse, et dépend de la localisation du site, du climat et de l'altitude. Les valeurs moyennes du poids volumique apparent de la neige sont indiquées :

Tableau 14. Poids volumique apparent moyen de la neige, issu de l’Eurocode 1-3 (annexe E informative)

Type de neige	Poids volumique apparent moyen [kN/m ³]
Neige fraîche	1,0
Neige établie (quelques jours ou quelques heures après la chute de neige)	2,0
Neige ancienne (plusieurs semaines ou mois après la chute de neige)	2,5 à 3,5
Neige mouillée	4,0

Les observations de neige disponibles étant des hauteurs (épaisseur de la couche de neige), la masse volumique de la neige a été prise égale à 1,5 kN/m³ (150 kg/m³) pour passer à des charges de neige au sol [98].

Le rapport [14] (p 70 et suivantes) présente différents modèles de densité de la neige pour 18 pays européens. Le tableau repris ci-après montre une hétérogénéité des pratiques allant d’une valeur fixe (entre 100 kg/m³ et 250 kg/m³, voire plus) à des modèles fonction de l’altitude ou de la hauteur de neige. Enfin certains pays calculent directement les charges de neige en équivalent hauteur d’eau sans passer par un modèle de densité (Allemagne, Suisse, Finlande et partiellement le Royaume-Unis).

Aux USA, une relation de la forme Charge=a*[hauteur]^b a été proposée pour une région montagneuse d’Arizona, en calant les coefficients a et b sur des observations de neige sur des stations qui mesurent à la fois hauteur de neige et équivalent en eau de la neige [99].

Tableau 15. Modèles de calcul de la densité de neige dans différents pays européens (étude de 1998 [97] reprise dans le rapport [14])

No.	CEN member	Density (kg/m ³)
1	Austria	250-300 altitude less than 1500 m above the sea level 350 altitude greater than 1500 m above sea level
2	Belgium	150
3	Denmark	Canadian snow pack model of Leaf/Brink, 200 - for naturally packed snow
4	Finland	Direct measurements of water equivalent, ≈ 250
5	France	150
6	Germany	Snow load factor of German Meteorological Office (DWD) $D = 159.81 + 129.82 h - 81.09 h^2 + 59.907 h^3 - 20.652 h^4$ for $h < 1.53$ m $D = 270$ for $h \geq 1.53$ m
7	Greece	125
8	Ireland	156.82
9	Iceland	The research group has converted depths to snow loads on the basis of a relation between snow depths and densities varying between 400 and 500 kg/m ³ indicated in a report from the Icelandic Meteorological Institute.
10	Italy	For low altitude: 250 For high altitude time-dependent model is used: 215 - 315 initial density value 315 mean density value in the constant period of the winter 315 - 515 increasing density value at the melting period
11	Luxembourg	150
12	Netherlands	100
13	Norway	225 - 325 for maximum depth occurring in December to May
14	Portugal	no data Spanish data assumed
15	Spain	During the period of maximum snow load: 100 ÷ 500 - for altitude from 1500 m to 2000 m 100 ÷ 270 - for altitude from 1000 m to 1500 m 100 ÷ 200 - for altitude from 800 m to 1000 m
16	Sweden	Different values for different parts of country: 230 - for Norrland to Dalsland (Internal, partly mountainous) 280 - for Götaland's coast, Gotland and Öland (islands) 240 - for remaining parts of Sweden
17	Switzerland	100 - for the new-fallen snow 200 - for snow after several hours or days since snowfall 300 - average value at maximum snow load 350 - old snow (after weeks or months since snowfall) 400 - wet snow
18	UK	156.82

Le sujet de l'évaluation de la charge de neige à partir d'observations de hauteur a été discuté en GT lors de plusieurs réunions. S'il existe des instruments pour mesurer la charge de neige au sol, la mesure n'est pas faite régulièrement et les données disponibles sont très limitées (cf. 2.2.1.4). Différentes pistes ont été suggérées pour approfondir ce sujet complexe, notamment en plaine où la neige peut survenir dans des situations météorologiques variées croisant chute de neige, fonte, pluie, regel...

Il n'a pas été possible de converger au sein du GT sur une valeur de densité pour la caractérisation de la neige de référence WENRA majorant la valeur retenue en France pour l'établissement de la carte de l'annexe nationale de l'Eurocode.

5.3. Travaux de recherche à partir de simulations climatiques

Cette partie présente quelques méthodes et résultats issus de travaux de recherche récents, fondés sur des résultats de réanalyse ou des simulations climatiques, notamment [28] [31] [32] [51].

L'étude [32] utilise des données de charges de neige issues de réanalyses, ici SAFRAN-Crocus sur la zone des Alpes. Les analyses statistiques sont alors appliquées aux charges de neige recalculées. Les variantes des ajustements GEV sur les maximums annuels permettent de corriger les problèmes liés à ce modèle. Ainsi, un modèle de Poisson mixte permet de prendre en compte la présence d'hivers sans neige et les modèles non stationnaires permettent de prendre en compte la tendance liée au changement climatique. Cependant, ces approches statistiques plus complexes ne suffisent pas à résoudre le problème du manque de données nécessaires à des extrapolation statistiques vers des niveaux $10^{-4}/\text{an}$.

L'étude [32] sur les charges de neige estime que la valeur de densité de neige fixée par l'Eurocode sous-estime généralement la densité de neige des records de charge de neige, telle qu'issue des réanalyses, pour la majorité des massifs des Alpes françaises à partir de 900m. A noter par ailleurs que les maximas de charges de neige n'ont pas nécessairement lieu les mêmes jours et dans les mêmes conditions que les maximas de hauteurs de neige. L'utilisation des maximas de hauteur de neige pour estimer les maximas de charges de neige est donc critiquée.

Les travaux du programme d'inter-comparaison ESM-SnowMIP [51] montrent la diversité des modèles globaux et locaux disponibles pour modéliser la neige. De nombreux modèles existent, avec différents maillages et niveaux de complexité. Le manque de données de neige et la variété des modèles provoquent de larges variations entre les couples de modèles sans que la complexité soit gage de fiabilité.

L'étude [28] a recours à des données tirées des modèles issus du programme CORDEX. L'étude présente une inter-comparaison entre 9 couplages de modèles globaux et de modèles régionaux. Elle utilise les projections de l'équivalent en eau du manteau neigeux simulé et compare les charges de neige obtenues avec les scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. La projection court de 1951 à 2100 sur l'ensemble de l'Europe, en utilisant des fenêtres temporelles consécutives de 40 ans décalées de 10 ans l'une par rapport à l'autre. Une vérification est faite en comparant les résultats des modèles et les valeurs mesurées par 42 stations suisses et allemandes sur la période 1951-2020. Cette étude [28] propose des corrections permettant de couvrir des valeurs cinquantennales plus élevées (estimées en climat actuel), avec des pondérations comprises entre 1,05 et 1,50 suivant les zones. De plus, les auteurs recommandent une approche prudente dans la définition des charges de conception afin de prendre en compte la variabilité et l'incertitude des modèles dans l'évaluation de la fiabilité.

En conclusion, de nombreuses chaînes de calculs de modèles climatiques globaux, couplés à des modèles régionaux et à un modèle du manteau neigeux existent pour simuler des chutes de neige. Cette approche semble privilégiée dans les travaux de recherche identifiés par le GT et permet la prise en compte des effets du changement climatique en utilisant divers scénarios d'évolution.

Les résultats sont variables d'un modèle à l'autre, surtout pour les zones et les hivers les plus chauds. Dans tous les cas, le manque d'observation de neige rend difficile une validation des modèles, notamment pour les valeurs extrêmes et dans les zones de plaine⁶⁸.

Les probabilités ciblées dans ces études sont supérieures ou égales à $10^{-2}/\text{an}$ et ne reposent que sur des réanalyses ou des simulations en climat futur de quelques décennies.

Ces travaux apparaissent ainsi comme une piste prometteuse mais non encore opérationnelle, surtout pour atteindre le niveau de retour WENRA ciblé en sûreté nucléaire.

⁶⁸ La majorité des études, focalisées sur les chutes de neige à plus forte altitude, se contentent d'exclure les stations dépassant un pourcentage fixe d'années sans neige. La possibilité de grouper les stations par catégorie d'altitude a été explorée dans l'étude [31], mais ces catégories représentent mieux les altitudes hautes.

5.4. Bilan des options possibles pour atteindre la cible WENRA

5.4.1. Paramètres physiques à quantifier

Les effets sur les structures et équipements sont principalement des effets de chargement en pression (poids de neige sur les structures) et d'obstruction par la hauteur de neige. Ainsi la neige doit être à la fois caractérisée en termes de charge et de hauteur, ces deux grandeurs étant reliées par la densité de la neige.

La neige est généralement caractérisée par une mesure d'épaisseur de neige aussi appelée hauteur de neige. Néanmoins, la charge (ou la masse volumique) est également une grandeur accessible à la mesure ou à l'évaluation par modélisation. Ainsi, dans l'inventaire des méthodes réalisées par le GT, il a été retenu d'étudier soit l'épaisseur de neige, soit une charge associée à une densité.

La durée du phénomène de neige, initialement envisagée n'a pas été retenue comme une variable à quantifier au vu de difficultés méthodologiques et de l'absence d'enjeu directement lié à la durée du phénomène (les aspects organisationnels semblant plus impactants que les seuls aléas). La partie concernant les autres effets § 5.7 (Manque de Tension du site, isolement) a montré que la gestion de ces effets ne requerrait pas de quantification de durée de l'aléa neige.

5.4.2. Inventaire des méthodes

Sur la base des études disponibles sur la neige en plaine et de travaux de recherche⁶⁹, le GT a cherché à classifier les différentes méthodes pour caractériser un aléa neige atteignant la cible WENRA.

Cette classification est présentée sous forme d'un tableau ci-dessous.

Tableau 16. Méthodes de caractérisation de la neige extrême recensées par le GT

Type de méthode	Description succincte des principes	Avantages	Inconvénients / limites	Commentaires
Traitement statistique à partir d'observations	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de la théorie des valeurs extrêmes pour extrapoler un échantillon d'observations (hauteur de neige) Evaluation de la densité menée de façon séparée 	<ul style="list-style-type: none"> Fournit une période de retour Méthode éprouvée (études Météo-France, CSTB, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Théoriquement non applicable à la neige en plaine, compte tenu d'un faible nombre d'observations disponibles Pas d'étude recensée tenant compte du changement climatique (sur les hauteurs de neige extrêmes en plaine) Traitement séparé et forfaitaire de la densité de la neige 	C'est néanmoins la méthode la plus utilisée actuellement
Traitement statistique à partir de données de réanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Simulation numérique des événements du passé : Réanalyse météorologique (SAFRAN) couplée avec modèle de manteau neigeux (Crocus) => Elaboration de différentes variables décrivant l'état du manteau	<ul style="list-style-type: none"> Peut compléter les échantillons d'observation (impact limité sur le problème du nombre insuffisant d'observation) Évalue les hauteurs mais aussi les masses volumiques ou les charges de neige 	<ul style="list-style-type: none"> Démonstration de la validité du modèle dans les extrêmes à faire La limite liée au faible nombre d'observations disponibles subsiste en plaine 	Méthode mise en œuvre dans l'étude Météo-France [101]. De fortes incertitudes identifiées

⁶⁹ Notamment les références suivantes : Etude à l'échelle européenne [14] [97], études CSTB [98], travaux Météo-France [33][34][100] [101], travaux de recherche récents, fondés sur des résultats de réanalyse ou des simulations climatiques : [28][31][32][51] et autres travaux [102]

Traitement statistique à partir de simulations longues par modèle climatique	Simulation d'un grand nombre d'évènements à partir d'un modèle climatique, couplé à un modèle modélisant le manteau neigeux => Elaboration de différentes variables décrivant l'état du manteau	<ul style="list-style-type: none"> Génération de nombreuses réalisations (de nature à résoudre la problématique du nombre insuffisant d'observation) Possible prise en compte du changement climatique 	<ul style="list-style-type: none"> Chaîne de calcul complexe, avec biais possibles dans la descente d'échelle nécessaire à partir des simulations globales => corrections / incertitudes fortes Temps de simulation « raisonnables » pour permettre un grand nombre de simulations Capacité des modèles climatiques à rendre compte des situations extrêmes ? 	Pas de mise en œuvre de la méthode identifiée à ce jour en plaine (sur la France)
Simulation stochastique	Simulation d'un grand nombre d'évènements sur la base d'un modèle statistique représentant le processus aussi bien dans sa partie centrale que dans ses extrêmes, éventuellement en utilisant des co-variables comme les précipitations et la température	<ul style="list-style-type: none"> Génération de nombreuses réalisations (de nature à résoudre la problématique du nombre insuffisant d'observations) Le modèle retenu doit représenter au mieux les caractéristiques statistiques des observations 	Existence et disponibilité d'un modèle adéquat : <ul style="list-style-type: none"> Il est nécessaire que le modèle soit capable de bien représenter les extrêmes, de façon à pouvoir créer des extrêmes potentiellement non encore observés Besoin de données suffisantes pour caler le modèle 	<ul style="list-style-type: none"> Pas de mise en œuvre identifiée pour la hauteur de neige en plaine Mise en œuvre pour modéliser des phénomènes différents : <ul style="list-style-type: none"> - accrétion de neige [102] - par le CSTB pour des couplages vent-neige
Maximum probable	Sur la base d'un modèle rendant compte de la physique des phénomènes, un scénario « extrême réaliste » est choisi pour les paramètres d'entrée. Le résultat du modèle donne un maximum probable	<ul style="list-style-type: none"> Fournit une valeur correspondant à un maximum physique 	<ul style="list-style-type: none"> Ne fournit pas de période de retour – le maximum ainsi obtenu peut-être très éloigné de l'objectif probabiliste initial La validité du modèle dans les extrêmes doit être démontrée Difficulté à définir un scénario « extrême réaliste » sur les paramètres d'entrée 	Type de méthode utilisé aux USA sur certaines agressions Pas de mise en œuvre identifiée en France

Un nombre important d'études de caractérisation de la neige identifiées par le GT repose sur la théorie des statistiques des extrêmes appliquées à des observations de hauteur de neige. Néanmoins, cette approche traditionnelle se heurte à différentes limites théoriques (nombre d'observations de neige insuffisante) et difficultés pratiques (difficulté d'ajustement des valeurs exceptionnelles). L'analyse statistique de la neige souffre, particulièrement en plaine, du faible nombre de chutes de neiges annuelles et de la fréquence d'années sans neige.

Pour pallier le manque de données observées, certaines études utilisent des données de charges de neige issues de réanalyses. Les analyses statistiques sont ensuite appliquées à la charge de neige recalculée.

Une alternative à la réanalyse serait l'utilisation de simulations longues de modèles climatiques (en climat actuel, voire en climat futur) ou des simulations stochastiques, permettant de générer un nombre plus important de réalisation de chute de neige en plaine. La résolution spatiale de ces simulations climatiques apparait également un facteur important pour disposer de scénarios représentatifs d'extrêmes locaux.

La carte de l'Annexe française de l'Eurocode se fonde sur des mesures de hauteur de neige de 1945 à 1992. Un coefficient fixe de densité permet le calcul de charges de neige. Ce coefficient est fixé arbitrairement à une valeur de 150 kg/m³, ce qui ne recouvre pas toutes les situations de charges de neige. Les travaux de recherche les plus récents ([28] par exemple) s'orientent vers des méthodes de simulations climatiques en se fondant directement sur des estimations de charge de neige pour proposer des corrections des valeurs des cartes de l'Eurocode.

5.4.3. Conclusion / préconisations

Les échanges lors des réunions du GT, en particulier lors des réunions de 6 janvier 2022 et du 8 avril 2022 ont permis de converger vers la rédaction d'une proposition commune des membres du GT décrite ci-après.

Parmi les différentes approches recensées, le GT considère prioritaire de développer des méthodes fondées sur des modèles climatiques globaux, couplés à des modèles régionaux et à un modèle du manteau neigeux. Les simulations longues de modèles climatiques (en climat actuel, voire en climat futur) permettraient de générer un nombre plus important d'événements de chute de neige en plaine et de vérifier par ailleurs la robustesse des niveaux d'aléas vis-à-vis des effets du changement climatique⁷⁰.

Ces approches apparaissent prometteuses, elles sont déjà utilisées en montagne mais ne sont pas encore opérationnelles en plaine pour des niveaux d'événements rares. Deux points d'attention ont notamment été identifiés par le GT : le manque d'observation de neige rend difficile la validation des modèles en plaine et la résolution spatiale des simulations climatiques apparaît être un facteur important pour disposer de scénarios représentatifs d'extrêmes locaux.

Le GT a donc défini l'approche simplifiée suivante pour répondre au mieux aux préconisations WENRA compte tenu de l'état des connaissances recensé par le GT :

Le GT préconise de définir une charge de neige de référence WENRA à partir d'une charge de neige au sol cinquantennale, pondérée par un facteur de majoration multiplicatif.

La charge de neige au sol cinquantennale peut être établie :

- à partir de la carte nationale de référence de l'Eurocode 1-3, en retenant la valeur caractéristique de la charge au sol (considérée de l'ordre de grandeur cinquantennale) ;
- à partir d'une étude statistique tenant compte de plusieurs stations météorologiques localisées à proximité du site d'étude et d'une reconstitution des charges de neige au sol via des réanalyses climatiques des événements passés, soit en supposant une densité de neige au moins égale à celle retenue pour le calcul de la carte de l'annexe nationale de l'Eurocode 1-3 (150 kg/m³).

Il n'est cependant pas permis d'utiliser une analyse statistique particulière reposant sur une ou quelques stations météorologiques pour fixer une valeur cinquantennale de neige inférieure à celle définie par la carte annexée à l'Eurocode 1-3⁷¹.

Le facteur de majoration est a priori commun à l'ensemble des sites. Différentes valeurs de majorations ont été discutées au sein du GT et sont globalement comprises entre 2 et 4.

La valeur de neige de référence WENRA devrait couvrir les records observés sur site et de la « région météorologique » (ensemble de sites présentant une certaine homogénéité météorologique). Un travail spécifique de recensement auprès de Météo-France est nécessaire pour cela.

La suite de cette partie présente les commentaires que les membres du GT ont souhaité formuler sur cette proposition.

⁷⁰ Pour mémoire, comme indiqué au § 2.2.2, « Dans le cadre de la sûreté nucléaire, le fait de ne pas tenir compte d'effet du changement climatique sur les hauteurs et les charges de neige apparaît une démarche pragmatique et adaptée compte tenu de l'état des connaissances actuelles. »

⁷¹ Cf. AN Eurocode 1-3, clause 4.1(2) Note 1 : « Il n'est pas permis d'utiliser une analyse statistique particulière pour fixer une valeur caractéristique de la charge de neige au sol inférieure à celle définie par la carte annexée à la présente norme. » (à noter qu'il n'existe pas de clause équivalente vis-à-vis de la carte de l'annexe nationale de l'Eurocode 1-4 concernant le vent)

A noter qu'en complément de la définition de la neige de référence WENRA, l'IRSN a proposé la prise en compte des effets d'accumulation associés à des chutes de neige et que le GT a évoqué la possibilité de tenir compte de dispositions de déneigement (sous conditions). Ces préconisations sont tracées en partie 5.8.

Éléments transmis par EDF

EDF rappelle qu'il n'existe pas de méthode statistique adaptée à la neige pour l'estimation de la charge de neige en plaine sur le territoire français métropolitain pour des périodes de retour élevées, a fortiori pour une période de retour 10 000 ans. Les tentatives réalisées visant une période de retour centennale montrent une très forte sensibilité à l'ajustement et aux méthodes utilisées, en raison notamment de la faible densité des échantillons qui rend très incertain le choix des lois et l'estimation des paramètres associés.

La construction du niveau de neige à la cible (PR 10 000 ans) pour les nouvelles installations à EDF consiste à considérer la charge de neige au sol de l'Eurocode (PR 50 ans) et appliquer un coefficient multiplicatif, égal à 2. La valeur obtenue est ensuite comparée aux maxima historiques à proximité du site, pour obtenir une marge suffisante. Par ailleurs, EDF rappelle également que pour les nouveaux réacteurs, le niveau DBD (domaine de conception de référence) est complété par un niveau DED (au-delà du dimensionnement)⁷².

Les valeurs proposées de maxima historiques sont basées sur une étude Météo-France, qui porte sur 13 stations et calcule les charges de neige grâce à la réanalyse SAFRAN-CROCUS. La valeur caractéristique de la charge de neige au sol ainsi obtenue pour le niveau de référence EPR2 est égale à 180 daN/m², couvrant tous les maxima historiques⁷³.

Éléments transmis par ORANO

ORANO considère qu'une utilisation de coefficients de pénalisation trop importants, risque de conduire à des pénalisations trop fortes. Comme discuté lors du GT, une densité de neige élevée n'est pas de nature à être déplacée par le vent et s'accumuler ailleurs. Une valeur de 2 en l'état actuel apparaît préférable par défaut, sous réserves de compatibilité avec les maximums historiques, dans l'attente d'études complémentaires, permettant de préciser d'éventuels critères pouvant influencer sur le choix de la majoration à retenir tant vis-à-vis de l'aléa (région, données disponibles) que vis-à-vis des enjeux de sûreté.

Éléments transmis par le CEA

Le CEA considère que le facteur de majoration de 4 sur la charge de neige, proposé par l'IRSN, est démesuré, d'une part, au regard de la tendance déjà observée de diminution de l'occurrence, de la hauteur et de la charge de la neige, y compris en plaine, et, d'autre part, compte tenu de la méthodologie retenue consistant à majorer fortement à la fois la densité et la hauteur de neige sans preuve scientifique de la réalité de cette concomitance de majoration sous les conditions climatiques métropolitaines françaises actuelles et projetées dans le futur. Le CEA considère qu'un facteur de majoration de 2 sur la charge de neige est déjà enveloppe dans l'état actuel des connaissances.

⁷² Cf. § 3.1.4

⁷³ Observés à la station météorologique de référence retenue pour l'étude du site

Éléments apportés par l'IRSN

L'IRSN considère que des travaux supplémentaires seraient nécessaires pour établir des niveaux d'aléa neige rares à partir de méthodes fondées sur des modèles climatiques globaux, couplés à des modèles régionaux et à un modèle du manteau neigeux.

Dans l'attente de telles études, l'IRSN soutient la proposition commune et a proposé un coefficient de majoration égal à 4. Cette proposition repose sur les éléments suivants :

- *Une majoration par un facteur 3 est nécessaire pour couvrir un certain nombre de records observés, déjà actuellement recensés, sachant que des données complémentaires (issues du réseau climatologique d'Etat par exemple) pourraient compléter le retour d'expérience sur les records de neige observés,*
- *La densité de la neige est une grandeur fortement variable selon l'humidité et la durée des épisodes de neige, pouvant modifier d'un facteur 2 la charge de neige dans le cas par exemple de neige mouillée par rapport à une neige établie (§ 5.2.2).*

Dans l'attente d'études permettant d'évaluer des charges de neige extrêmes, notamment en plaine où la neige peut survenir dans des situations météorologiques variées croisant chute de neige, fonte, pluie, regel..., l'IRSN considère qu'une majoration par un facteur 4 de la charge de neige cinquantennale définie dans l'Eurocode permet de couvrir de façon adaptée les incertitudes associées à l'évaluation d'un niveau WENRA pour l'aléa neige.

5.5. Effet direct de chargement de la neige sur les structures

Cette partie a été rédigée par le CSTB.

5.5.1. Charges de neiges sur les constructions selon l'Eurocode 1-3

L'Eurocode 1-3 accompagné de son annexe nationale a pour objectif l'évaluation des charges de neige sur les constructions. La méthode de calcul proposée prend en compte la plupart des facteurs qui influencent la manière dont la neige est distribuée sur une toiture.

L'Eurocode 1-3 considère les bâtiments selon les configurations suivantes :

- toitures à un seul versant,
- toitures à deux versants,
- toitures à versants multiples,
- toitures cylindriques,
- toitures adossées à des constructions plus élevées ou très proches d'elles,
- accumulation au droit des saillies et des obstacles,
- neige suspendue en débord de toitures,
- charges de neige sur les barrières à neige ou autres obstacles.

L'annexe nationale de l'Eurocode 1-3 précise l'aléa de référence (charge de neige au sol) à considérer selon la localisation géographique de la construction sur le territoire national et modifie certaines règles du texte de l'Eurocode 1-3. Pour les constructions situées en France, les modifications introduites par l'annexe nationale prévalent sur les règles de l'Eurocode 1-3.

A noter qu'un travail de révision de l'Eurocode 1-3 est en cours. Initié en avril 2018, un groupe de travail européen a élaboré une révision du texte dont la dernière version a été soumise à consultation en avril 2021. Cette proposition introduit des modifications notables dans la façon d'évaluer les charges de neige à prendre en compte pour le dimensionnement des structures.

La présentation de l'Eurocode 1-3 dans la suite de ce paragraphe distinguent le texte actuellement en vigueur et ses évolutions probables dans les mois à venir.

5.5.1.1. Principe de l'évaluation de la charge de neige sur une toiture

Principes généraux

Les effets du chargement des toitures par la neige se traduisent par des coefficients appliqués à la charges de référence de neige au sol selon la localisation et l'altitude de la construction (cf. annexe nationale) S_k qui permettent de déterminer la charge de neige en toiture à considérer pour le dimensionnement de l'ouvrage.

Parmi les principaux facteurs qui influencent la charge de neige en toiture on distingue :

- la forme de la toiture prise en compte par l'intermédiaire d'un coefficient de forme μ (cf § 5.1.2),
- les conditions climatiques locales, le vent, les variations de températures et la fréquence des précipitations (pluie ou neige). L'impact du vent est plus particulièrement pris en compte dans l'Eurocode 1-3, par l'augmentation des accumulations de neige qu'il induit dans les endroits sous le vent ou protégés du vent et leur réduction dans les endroits plus exposés. La répartition irrégulière de la neige sur les constructions due au vent est transcrite par les variations des coefficients de formes à prendre en compte selon l'emplacement de la toiture ainsi que dans les calculs d'accumulation de neige dues aux appendices et obstacles ;
- la proximité d'arbres ou d'autres constructions, soit en raison de la présence d'un bâtiment plus élevé dont la charge de neige peut être en partie déplacée sur la construction à l'étude, soit en produisant une protection vis-à-vis des vents dominants de la construction étudiée. Dans ce dernier cas, l'effet de protection est pris en compte dans le coefficient d'exposition C_e qui intervient dans le calcul de la charge de neige résultante S ;
- la topographie locale qui détermine la situation d'exposition de la construction. La différence de niveau de la construction par rapport au terrain environnant conduit à une exposition augmentée ou réduite vis-à-vis du vent et par conséquent de son impact sur les dépôts de neige en toiture. Ceci est pris en compte par le coefficient d'exposition C_e ;
- les déperditions thermiques de la construction qui favorisent la réduction de la charge de neige est prise en compte par le coefficient C_t .

Quelle que soient les conditions auxquelles la construction étudiée peut être soumise, conditions normales ou exceptionnelles, conformément aux principes semi-probabilistes des Eurocodes, l'Eurocode distingue deux situations de projet :

- les situations de projet durables/transitoires qui correspondent à une utilisation normale ou à des phases temporaires d'exécution ou de réparation de l'ouvrage ;
- les situations de projet accidentelles dans lesquelles l'action accidentelle est la neige.

La charge de neige s'exerce verticalement selon une projection horizontale de la toiture.

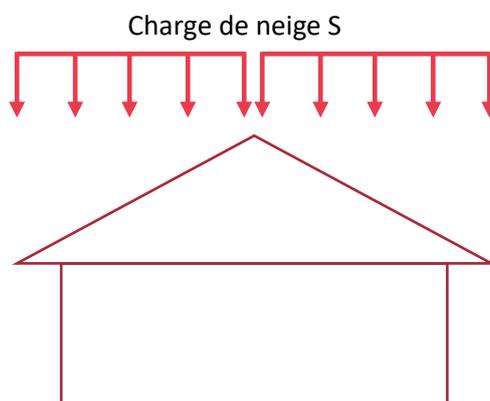


Figure 43 : Principe d'application des charges de neige sur les constructions selon l'Eurocode 1-3

L'expression analytique qui permet de calculer la charge de neige S est :

- 1) Pour les situations de projet durables et transitoires,

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_k \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Avec :

- C_e Coefficient d'exposition,

Les valeurs de C_e spécifiées par l'Eurocode 1-3 selon que la construction est, du fait de son environnement, en conditions exposées, courantes ou protégées sont respectivement 0,8, 1 et 1,2. L'annexe nationale française limite le choix du coefficient à deux valeurs numériques :

$C_e = 1,25$, lorsque les conditions d'abri quasi permanentes des toitures dues aux bâtiments voisins conduisent à empêcher pratiquement le déplacement de la neige par le vent,

$C_e = 1$, dans tous les autres cas.

- C_t Coefficient thermique,

L'annexe nationale française impose la valeur $C_t = 1$, sauf spécification particulière propre au projet.

- s_k Charge de neige au sol à l'emplacement considérée,
- μ_i Coefficient de forme de la partie de toiture considérée,

- 2) Pour les situations de projet accidentelles dans lesquelles l'action accidentelle est la charge exceptionnelle de neige,

$$s = \mu_i \times C_e \times C_t \times s_{Ad} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Avec :

- s_{Ad} Charge de neige au sol exceptionnelle à l'emplacement considéré,

La valeur de charge exceptionnelle s_{Ad} à prendre en compte est indiquée par l'annexe nationale et est indépendante de l'altitude ;

Projet d'évolution de l'Eurocode 1-3 (avril 2020)

Les effets du vent sur les charges de neige ont été brièvement évoqués précédemment. Rappelons que d'une façon générale, l'écoulement du vent autour des constructions a tendance à réduire la quantité de neige reçue par la toiture par rapport à celle qui se dépose au sol. De plus, le vent a tendance à balayer et emporter la neige des zones de toiture où la vitesse du vent est élevée (versant de toiture orienté au vent) et à en déposer une partie sur les zones de toiture où l'écoulement de l'air est ralenti (versant de toiture sous le vent dans le cas où la direction principale du faîtage est perpendiculaire ou oblique par rapport à la direction du vent).

Le texte en vigueur de l'Eurocode 1-3, prend en compte ces phénomènes de manière simplifiée. La charge de neige sur les toitures est déduite de celle présente au sol (s_k) en lui appliquant un facteur μ qui ne dépend que des caractéristiques géométriques de ces toitures. En situation courante d'un bâtiment de forme simple, l'effet de réduction de la charge de neige en toiture par rapport à la charge de neige au sol se traduit par une valeur de μ inférieure à 1 ($\mu=0,8$ pour les toitures de forme simple et de pente modérée).

L'application du coefficient d'exposition C_e est destiné à corriger le résultat $\mu \times s_k$, soit dans le sens d'une aggravation de la charge ($C_e=1,2$; $1,25$ en France) dans les cas où la toiture se trouve en réalité abritée des effets du vent, soit dans le sens d'une réduction ($C_e=0,8$) lorsque la toiture se trouve exposée aux vents. Sauf cas particulier, le coefficient C_e est le plus souvent choisi égal à 1 ce qui correspond à une situation dite normale.

Le projet d'évolution de l'Eurocode 1-3 inclut une formulation différente de la charge de neige S. Pour les situations de projet durable ou transitoire et pour les situations accidentelles, les formulations sont respectivement :

$$s = \mu_i \times C_t \times s_k \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad \text{et} \quad s = \mu_i \times C_t \times s_{Ad} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Le coefficient d'exposition C_e n'apparaît plus explicitement dans la formulation. Il est pris en compte dans le coefficient de forme μ_i afin d'y intégrer les effets du vent sur la distribution de la neige sur les toitures.

L'Annexe 14 présente plus en détail l'application de l'Eurocode 1-3 pour des toitures simples (toitures à un seul versant, à deux versants, à versants multiples) ou cylindriques.

5.5.1.2. Cas des toitures adossées à des constructions plus élevées ou très proches

On considère que les toitures sont proches si la distance qui les sépare est inférieure à 1,5m.

La disposition de charge de neige sur une toiture proche d'une toiture plus élevée est évaluée à partir d'un coefficient μ_1 constant et d'un coefficient μ_2 qui traduit l'effet combiné du vent μ_w et du glissement de la neige μ_s depuis la toiture la plus haute. Le coefficient μ_w dépend des dimensions principales des parties haute et basse du bâtiment (b_1 et b_2), alors que le coefficient μ_s est fonction de la charge de neige sur la partie haute.

Pour l'évaluation des charges sans accumulation (cas i) le coefficient de forme est constant (Figure 44).

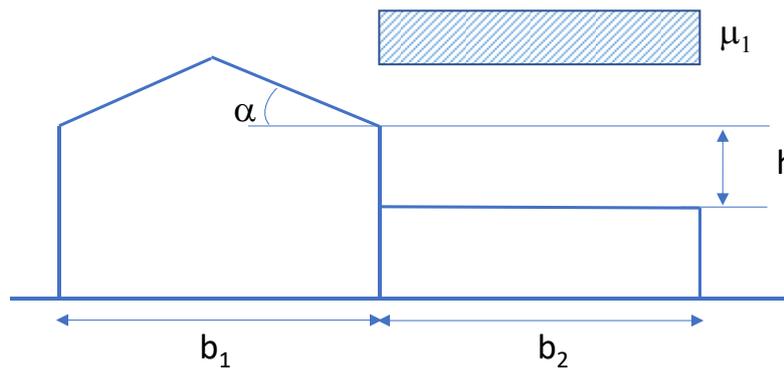


Figure 44 : Coefficient de forme pour une toiture attenante à une construction plus élevée ou très proche d'elle sans accumulation (cas i)

La disposition de charges avec accumulation (cas ii ci-dessous) considère le chargement dû au vent et au glissement de la neige depuis la partie haute de la toiture.

Le calcul nécessite de déterminer le coefficient de forme dû au glissement μ_s tel que :

$$\mu_s = 0 \quad \text{pour } \alpha \leq 15^\circ$$

$$\mu_s = \frac{1}{2} \times \frac{S_{sup}}{C_e C_t s_k} \quad \text{pour } \alpha > 15^\circ \quad \text{avec } S_{sup} \text{ la charge de neige sur la toiture plus élevée,}$$

La disposition des charges fait également intervenir une longueur d'accumulation l_s telle que $l_s = 2h$. Ceci conduit à distinguer les cas où la dimension de la partie basse de la construction b_2 est inférieure ou supérieure à la longueur l_s .

Le coefficient de forme dû au vent μ_w tel que :

$$\mu_w = \frac{1}{2} \times \frac{b_1 + b_2}{2h} \leq \frac{\gamma \times h}{s_k} \quad \text{avec } \gamma \text{ le poids volumique de la neige égal à } 2\text{kN/m}^3,$$

La valeur du coefficient μ_w est bornée, $0,8 \leq \mu_w \leq 2,8$ selon l'annexe nationale de l'Eurocode 1-3.

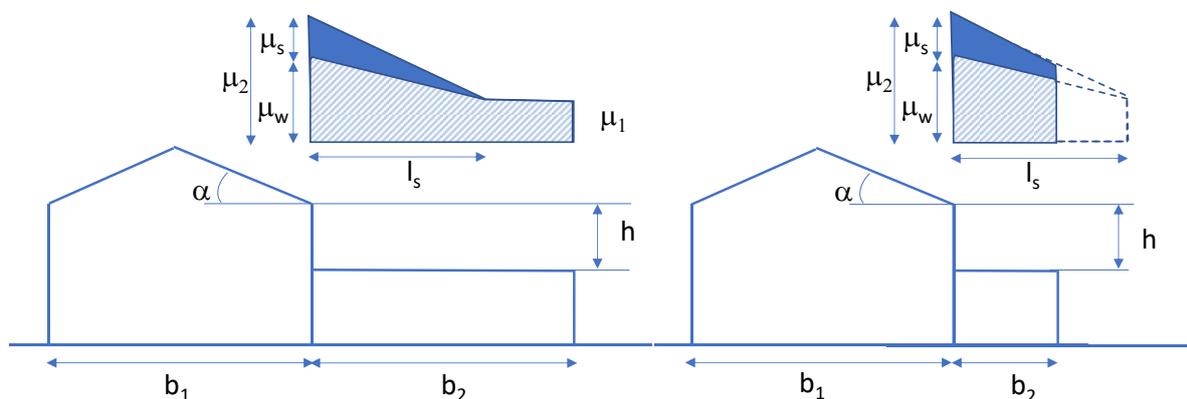


Figure 45 : Coefficient de forme pour une toiture attenante à une construction plus élevée ou très proche d'elle avec accumulation (cas ii)

Projet d'évolution de l'Eurocode 1-3 pour les toitures adossées à des constructions plus élevées ou très proches

De façon similaire aux précédentes configurations de toitures, le coefficient de forme qui s'applique aux toitures adossées à des constructions plus élevées du projet de révision de l'Eurocode 1-3, dépend du coefficient d'exposition C_e .

Pour l'évaluation des charges sans accumulation (cas i,) le coefficient de forme μ_1 est constant et s'exprime sous la forme :

$$\mu_1 = 0,8 \times C_{e,F} \quad \text{pour les toitures plates (ou avec une pente inférieure à } 5^\circ)$$

Ou

$$\mu_2(\alpha_2, C_e) = \mu_{2,b}(\alpha_2, C_e) \quad \text{pour les toitures avec une pente d'angle } \alpha_2, \text{ avec } \mu_{2,b} \text{ donné par le Tableau 17.}$$

Tableau 17. Coefficient de forme de base en fonction de la pente pour une toiture à versants inclinés (cas i)

α pente selon l'horizontale	$5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 70^\circ$	$70^\circ < \alpha$
$\mu_{2,b}(\alpha, C_e)$	$0,8 C_e$	$0,8 C_e (70-\alpha)/40$	0

Les charges avec accumulation (cas ii, Figure 45) d'une toiture attenante à une construction plus élevée sont évaluées par un coefficient de forme de forme μ_5 tel que :

$$\mu_5 = 0,8C_e\mu_L + \mu_s + \mu_w$$

Où μ_L est le coefficient de forme de référence pour les toitures plates μ_1 ou avec une pente $\mu_2(\alpha_2, C_e)$.

μ_s est le coefficient de forme qui prend en compte le glissement tel que :

$$\mu_s = 0 \quad \text{pour } \alpha \leq 15^\circ,$$

$$\mu_s = \frac{2b'_1}{l_s} [\mu_2(30^\circ, C_e) - 0,5\mu_2(\alpha_1, C_e)] \quad \text{pour } \alpha > 15^\circ,$$

μ_w est le coefficient de forme qui prend en compte la part du chargement de neige dû à l'érosion par le vent de la couverture de neige de la toiture haute et basse,

$$\mu_w = (2 - 1,6C_e) \left(\frac{\mu_U b_1}{l_s} + \frac{\mu_L b_2}{l_s} \right) \leq \max \left\{ 0, \frac{\gamma h}{C_t S_k} - \mu_s - 0,8C_e \mu_L \right\}$$

Où μ_U est le coefficient de forme de référence pour la toiture la plus élevée, tel que :

$$\mu_U = \begin{cases} \mu_1(C_e) \text{ pour } \alpha_1 \leq 5^\circ \\ \mu_2(\alpha_1, C_e) \text{ pour } 5^\circ < \alpha_1 \leq 15^\circ \\ 0,5\mu_2(\alpha_1, C_e) \text{ pour } \alpha_1 > 15^\circ \end{cases}$$

Et l_s est la longueur d'accumulation égale à $\min \left\{ \frac{4h}{C_e}; 15 \text{ m} \right\}$.

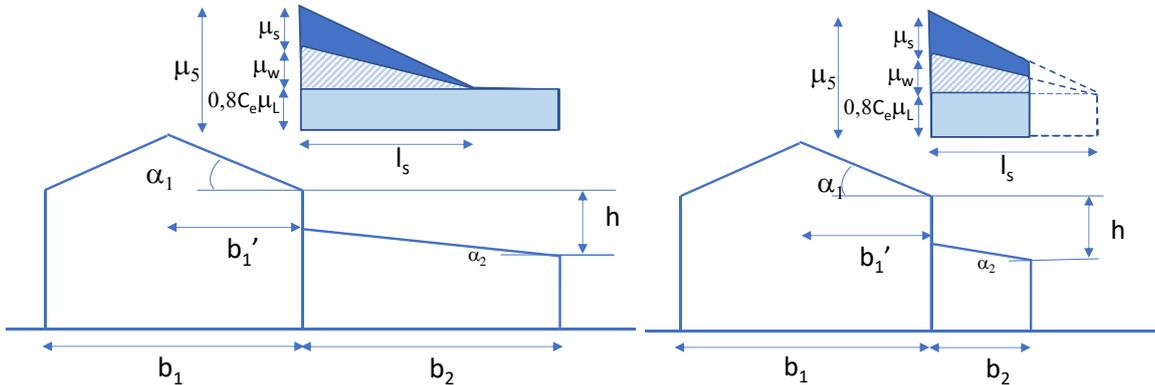


Figure 46 : Coefficient de forme pour une toiture attenante à une construction plus élevée ou très proche d'elle avec accumulation (cas ii)

Autres effets locaux

L'Eurocode 1-3 considère que d'autres effets locaux d'accumulations de neige sur les constructions peuvent se produire sous l'effet du vent et en présence d'obstacles. Cela peut être le cas d'éléments de toitures saillants, d'équipements aérodynamiques, d'acrotères, de parapets, de barrières à neige, etc.

Ces éléments sont le lieu de charges de neige localisées évaluées par l'intermédiaire de coefficients de forme dont la valeur dépend des dimensions des éléments considérés.

Des charges additionnelles en bord de toiture doivent être considérées pour les bâtiments situés à plus de 800m d'altitude s'ils présentent des débords de toitures.

5.5.2. Prise en compte des conditions des accumulations exceptionnelles

L'impact du vent est plus particulièrement pris en compte dans l'Eurocode 1-3, par l'augmentation des accumulations de neige qu'il induit dans les endroits sous le vent ou protégés du vent et leur réduction dans les endroits plus exposés.

L'Eurocode 1-3 distingue deux types de conditions selon le site d'implantation de la construction :

- les conditions normales sans chutes exceptionnelles et sans accumulation exceptionnelles (CAS A de l'annexe A de l'Eurocode 1-3),
- les conditions exceptionnelles qui considèrent séparément ou ensemble les conditions de chutes exceptionnelles et d'accumulation exceptionnelles, (Cas B1, B2 et B3 de l'annexe A de l'Eurocode 1-3).

Tableau 18. Tableau des situations de projet et dispositions de charge à utiliser selon les conditions de site (Annexe A de l’Eurocode 1-3)

Le Tableau A1 synthétise pour les quatre cas A, B 1, B 2 et B 3 (voir respectivement 3.2, 3.3 (1), 3.3(2) et 3.3 (3)) les situations de projet et les dispositions de charge à utiliser pour chaque projet individuel.

Tableau A.1 — Situations de projet et dispositions de charge à considérer selon les conditions de site

Conditions normales	Conditions exceptionnelles		
Cas A	Cas B 1	Cas B 2	Cas B 3
Pas de chutes exceptionnelles Pas d’accumulation exceptionnelle	Chutes exceptionnelles Pas d’accumulation exceptionnelle	Pas de chutes exceptionnelles Accumulation exceptionnelle	Chutes exceptionnelles Accumulation exceptionnelle
3.2(1)	3.3(1)	3.3(2)	3.3(3)
<i>Situation de projet durable/transitoire :</i>	<i>Situation de projet durable/transitoire :</i>	<i>Situation de projet durable/transitoire :</i>	<i>Situation de projet durable/transitoire :</i>
[1] sans accumulation $\mu_i C_e C_t S_k$	[1] sans accumulation $\mu_i C_e C_t S_k$	[1] sans accumulation $\mu_i C_e C_t S_k$	[1] sans accumulation $\mu_i C_e C_t S_k$
[2] accumulation $\mu_i C_e C_t S_k$	[2] accumulation $\mu_i C_e C_t S_k$	[2] accumulation (sauf pour les formes de toiture de l’Annexe B) $\mu_i C_e C_t S_k$	[2] accumulation (sauf pour les formes de toiture de l’Annexe B) $\mu_i C_e C_t S_k$
	<i>Situation de projet accidentelle (lorsque l’action accidentelle est la neige) :</i>	<i>Situation de projet accidentelle (lorsque l’action accidentelle est la neige) :</i>	<i>Situation de projet accidentelle (lorsque l’action accidentelle est la neige) :</i>
	[3] sans accumulation $\mu_i C_e C_t C_{est} S_k$	[3] accumulation $\mu_i S_k$ (pour les formes de toiture de l’Annexe B)	[3] sans accumulation $\mu_i C_e C_t C_{est} S_k$
	[4] accumulation $\mu_i C_e C_t C_{est} S_k$		[4] accumulation $\mu_i S_k$ (pour les formes de toiture de l’Annexe B)
NOTE 1	Les conditions exceptionnelles sont définies conformément à l’Annexe nationale.		
NOTE 2	Pour les cas B 1 et B 3 l’Annexe Nationale peut définir les situations de projet à considérer pour les divers effets locaux traités en Section 6.		

Selon l’annexe nationale, seules les conditions normales A et les conditions exceptionnelles B1 (chute exceptionnelle sans accumulation exceptionnelle) sont examinées systématiquement en France. Le cas B2 (pas de chute exceptionnelle mais accumulation exceptionnelle) n’a pas lieu d’être considéré en France et le cas B3 (chute exceptionnelle avec accumulation exceptionnelle) doit être pris en compte s’il en est explicitement fait mention dans les spécifications particulières du projet individuel.

Si les conditions exceptionnelles doivent être examinées, l’annexe nationale indique une charge de neige au sol particulière pour le dimensionnement de la structure en fonction de la localisation géographique du projet.

L’altitude du projet est également prise en compte par l’annexe nationale, qui fournit une expression analytique permettant de calculer la charge additionnelle de neige à prendre en compte en fonction de l’altitude au-delà de 200 m et jusqu’à 2000 m.

Pour chaque type de conditions (A ou B), l’Eurocode 1-3 distingue deux situations de projet :

- les situations de projet durables/transitoires qui correspondent à une utilisation normale ou à des phases temporaires d’exécution ou de réparation de l’ouvrage ;
- les situations de projet accidentelles dans lesquelles l’action accidentelle est la neige.

Le calcul doit également prendre en compte les deux dispositions de charges fondamentales :

- la charge de neige sans accumulation,
- la charge de neige avec accumulation.

L’annexe nationale spécifie les combinaisons de cas à considérer en France :

- Cas A, situation de projet durables/transitoires, dispositions sans et avec accumulation,
- Cas B1, situation de projet durables/transitoires, dispositions sans et avec accumulation,
- Cas B1, situation de projet accidentelle, dispositions sans accumulation,

- Cas B3, situation de projet durables/transitoires, dispositions sans accumulation pour tous les types de toitures et avec accumulation pour les toitures à 1 versant, à 2 versants et cylindriques (les accumulations localisées dues aux obstacles et appendices ne sont pas considérés dans ce calcul),
- Cas B3, situation de projet accidentelle, dispositions sans accumulation pour tous les types de toitures et avec accumulation pour les toitures à versants multiples, au contact ou proches de constructions plus élevées et celles supportant des accumulations dues à des obstacles ou appendices.

5.5.3. Effets non pris en compte dans les Eurocodes

Il convient de rappeler les effets des chutes de neige non pris en compte dans les Eurocodes :

- les effets dynamiques : il s'agit des effets d'impact liés à des chutes de neige sur des zones en contrebas d'autres bâtiments, en fonction de pente et caractéristiques de surface de la toiture surplombante,
- les effets mécaniques latéraux : il s'agit de la charge exercée sur une paroi verticale par la neige accumulée le long de cette paroi (ou entre deux parois)

Sur ces aspects, le GT n'a pas identifié de pratique particulière à mettre en œuvre. Il pourrait cependant être nécessaire de procéder à une étude spécifique en cas de configuration particulière, par exemple un équipement à protéger qui serait localisé en contrebas d'une toiture inclinée dépourvue de système empêchant la chute de neige.

5.6. Effet d'obstruction

5.6.1. Description

Le vent est susceptible d'engendrer une accumulation de neige importante contre les obstacles qu'elle rencontre et peut également entraîner un glissement de la neige depuis les toits des bâtiments, ce qui peut conduire à des hauteurs de neige importantes ou la formation de givre, susceptibles d'obstruer les prises de référence, les grilles de ventilation et équipements du circuit de ventilation des bâtiments (plénum d'entrée d'air, vanelles, registres...) et de perturber le fonctionnement des systèmes de ventilation.

5.6.2. État des lieux des pratiques des exploitants

Les éléments présentés ci-après concernant l'état des lieux de pratiques des exploitants sont issus des informations fournies par les exploitants dans le cadre du groupe de travail « Vent et Neige ».

EDF

Parc en exploitation : L'édition 2009 des règles NV intègre la prise en compte des chargements dus aux accumulations de neige. Compte tenu de l'évolution de ces règles par rapport à la conception il est vérifié la tenue fonctionnelle de l'équipement identifié comme cibles de sûreté : l'équipement doit continuer à assurer sa fonction en cas d'accumulation de neige.

Cas des EPR : Vis-à-vis des phénomènes d'accumulation, la hauteur maximale de neige potentiellement accumulée est calculée au moyen de l'Eurocode 1-3 selon les hypothèses citées dans le rapport de sûreté. L'Eurocode 1-3 permet de calculer les hauteurs de neige devant les ouvertures de ventilation en prenant en compte les phénomènes d'accumulation dus au vent (accumulation de la neige provoquée par le vent contre les obstacles ou au glissement de la neige depuis les bâtiments adjacents). Les hauteurs de neige accumulée sont comparées aux hauteurs des ouvertures de ventilation ayant un rôle vis-à-vis de la sûreté (ventilations classées, échappements diesels...) des différents bâtiments. Si la hauteur de l'ouverture est supérieure à la hauteur de neige estimée, aucune analyse n'est nécessaire. Sinon, EDF réalise une analyse de sûreté afin notamment d'évaluer si la quantité de neige est susceptible d'obstruer les ouvertures de ventilation de manière à remettre en cause le fonctionnement du système de ventilation associée et d'avoir des conséquences sur la sûreté de l'installation.

ANDRA

Pour le CSM, l'exploitation de la ventilation relève du fonctionnement normal dans la mesure où elle n'est requise que pour permettre la réalisation ponctuelle d'activités dans les locaux à risque radon.

Pour le CSA, le risque d'obstruction des ventilations par la neige sera considéré dans le cadre du prochain réexamen de sûreté.

Pour Cigéo, compte tenu du zonage régional (zone A1), la hauteur de neige maximale pouvant être retenue est 90 cm (en appliquant un facteur 2 sur la charge caractéristique au sol) en cas de chute de neige extrême. Les prises d'air des systèmes de ventilation sont situées à une hauteur supérieure à la hauteur de neige extrême retenue.

ORANO

Des dispositions de conception peuvent être mises en œuvre pour les entrées d'air sensibles (par exemple les entreposages de colis de produits de fission vitrifiés). Le risque d'obturation simultanée de toutes les entrées d'air par une congère de neige ou de givre peut ainsi être prévenu par :

- l'utilisation de grilles (ou colliers) antigivre au niveau des entrées d'air, chauffées électriquement,
- la hauteur de la prise d'air par rapport au sol,
- la grande surface des entrées d'air permet de conserver un tirage naturel, quelles que soient les conditions climatiques.

Les accumulations de neige sont prises en compte dans les référentiels d'exploitation présentés au § 3.5.1. Les procédures prévoyant de dégager au mieux en cas d'alerte neige, définie par l'atteinte de seuils prédéfinis de température et d'accumulation dans les zones « sensibles » (plénums, vanelles... pour site de La Hague), sur les terrasses ou sur les toitures.

En particulier, la vérification de l'absence de givre ou de neige au niveau des prises d'air, des prises de référence fait partie des actions à entreprendre et la surveillance du colmatage des filtres, ainsi que les dispositions à appliquer en cas d'accumulation (déblaiement, dégagement, adaptation du régime de ventilation...).

FRAMATOME

Les effets d'obturations des ventilateurs ne sont pas considérés, car la perte du confinement dynamique conduit à une mise à l'arrêt des équipements, mais l'installation reste dans un état sûr.

CEA

L'obstruction des ouvertures de ventilation par accumulation de neige (ou de glace) sur les grilles de prise d'air neuf fait partie du REX du CEA. Cet effet de la neige est donc pris en compte par le CEA dans sa démonstration de sûreté des installations.

Les dispositions constructives prises à la conception des installations sont les suivantes :

- cordons antigivre sur les grilles de prises d'air neuf,
- dispositifs au niveau des ouvertures de ventilation empêchant les entrées d'eau dues à la pluie ou à la neige (par exemple, auvents en acier protégés contre la corrosion),
- hauteur suffisante de la prise d'air par rapport au sol environnant vis-à-vis du risque d'accumulation de neige,
- positionnement des amenées d'air en fonction des vents dominants,
- prises d'air neuf mises en œuvre en dehors des axes des vents dominants ou conçues,
- omnidirectionnelles en permettant une circulation d'air sur plusieurs faces, n'induisant ainsi pas d'obturation,

- protection des amenées d'air par des systèmes brise-vent anti-gavage (parois au droit des ouvrants d'amenée d'air permettant de casser la dynamique du vent),
- grilles de prises d'air ne permettant pas l'entraînement d'eau ou de neige.

Les mesures organisationnelles se composent de rondes des équipes de jour et d'astreinte pour localiser les éventuelles obstructions des prises d'air neuf et les déneiger si nécessaire.

5.6.3. Synthèse/Préconisation

Le risque d'obstruction des prises d'air des grilles de ventilation et des équipements du circuit de ventilation des bâtiments (plénum d'entrée d'air, vanelles, registres...) par la neige, notamment en cas de vent susceptible d'augmenter la hauteur de neige, devrait être pris en compte dans la démonstration de sûreté de l'agression Neige.

5.7. Autres effets

Les éléments présentés ci-après concernant l'état des lieux de pratiques des exploitants sont issus des informations fournies par les exploitants dans le cadre du groupe de travail « Vent et Neige ».

5.7.1. Manque de Tension Externe

5.7.1.1. Description

La neige est susceptible d'endommager les équipements du réseau électrique et de générer un manque de tension externe.

5.7.1.2. État des lieux des pratiques des exploitants

EDF

Le cumul MDTE+ Neige n'est pas pris en compte sur la base des arguments suivants :

- il n'existe pas de REX ;
- les diesels de secours sont abrités dans des bâtiments vérifiés aux effets de la neige (fonction des diesels assurés pendant et après l'épisode de neige)
- en cas de MDTE, l'effet de la neige n'aggrave pas la situation.

ANDRA

Pour le CSA, le cumul de la situation « Neige » et d'un « MDTE » est exclu du fait :

- qu'en cas d'un MDTE (non déclenché par la neige), l'alimentation de secours (diesel) est enclenchée pouvant ainsi assurer le maintien des fonctions de l'exploitation (pendant de telles situations, certaines activités sont à l'arrêt : stockage, traitement des colis...). La distribution de l'électricité fournie est réalisée par des réseaux électriques enterrés non sensibles aux situations de neige (les eaux météoriques étant récupérées par les avaloirs et acheminées vers le bassin d'orage, et l'enfouissement des réseaux électriques étant de profondeur suffisante).
- qu'en cas de situation « Neige », les structures des bâtiments construites sur le CSA ont été conçues conformément aux règlements en vigueur à la date de construction. Par ailleurs, concernant les grilles de prise d'air de la ventilation nucléaire pour l'atelier de conditionnement des déchets, la prévention de leur obstruction par une accumulation de neige a été faite, à la conception, par leur positionnement sur la terrasse de ce bâtiment à plus de 60 cm du seuil de la terrasse. La situation « neige » n'a pas de conséquence sur le matériel alimenté en électricité (et non délesté en cas de MDTE), excluant ainsi le risque de cumul.

CEA

De façon générale, la description des installations électriques et les dispositions adoptées face aux aléas climatiques permettant d'assurer la fiabilité du réseau électrique sont décrites dans la Présentation Générale de la Sûreté de l'Établissement (PGSE) de chaque site CEA. La perte de l'alimentation électrique externe induite lors de l'endommagement des équipements du réseau électrique sous conditions climatiques extrêmes est considérée sur les installations du CEA. L'analyse de la perte des alimentations électriques et du réseau normal est considérée comme un risque en soit. Lorsque ce risque est induit par un autre risque, un renvoi à cette analyse est effectué. Cette analyse peut amener à installer des moyens fixes et/ou mobiles de groupe électrogène permettant de réalimenter les équipements appropriés.

ORANO

La perte de courant électrique (MDTE) dans les bâtiments est identifiée mais est traitée par la « conduite à tenir » en cas de perte d'alimentation électrique. L'événement du 11 mars 2013 à La Hague est à noter, ayant conduit à l'indisponibilité des mesures et prélèvements continus suite à la perte du réseau d'alimentation électrique, l'enneigement empêchant l'accès à la station pour intervention.

FRAMATOME

D'une manière générale, la perte d'alimentation électrique du réseau externe (réseau EDF « normal ») entraîne l'arrêt de la production et la mise en état sûr des équipements. L'alimentation électrique des équipements nécessaires pour maintenir les surveillances gaz, incendie, radioprotection et séisme est assurée par le réseau "permanent" puis par le réseau "secouru".

La perte totale d'alimentation électrique engendre la mise en état sûr des installations et ne constitue pas pour autant à elle seule une situation incidentelle.

5.7.1.3. Synthèse/Préconisation

Le recensement de l'état des pratiques actuelles des exploitants montre une approche hétérogène de prise en compte du risque de perte d'alimentation électrique du réseau externe en cas de neige.

Or la neige est susceptible d'endommager les équipements du réseau électrique et de générer un manque de tension externe. Compte tenu de cette dépendance, l'IRSN considère que le cumul d'un manque de tension externe avec l'aléa neige est à étudier dans la démonstration de sûreté des installations.

5.7.2. Isolement du site

5.7.2.1. Description

En cas de fortes chutes de neige, l'accès aux installations nucléaires de base risque d'être compromis (routes bloquées...).

5.7.2.2. État des lieux des pratiques des exploitants

EDF

Suite à l'épisode neigeux exceptionnel de mars 2013, il a été décidé d'inclure à la RPC Grand Froid les enseignements de cet épisode. Ce REX se traduit par des prescriptions visant à anticiper au mieux l'épisode neigeux et à disposer de ressources humaines et matérielles suffisantes en cas d'isolement du site. L'isolement neige est défini comme suit : l'incapacité de tout ou partie du personnel d'astreinte technique à réaliser en sécurité dans le délai réglementaire, le trajet domicile/travail.

La RPC définit les conditions d'entrée et de sortie des différentes phases : veilles, vigilance, pré-alerte, alerte et retour à la normale.

Durant la phase de veille, l'exploitant s'organise dans le but d'anticiper l'isolement du CNPE afin de disposer de toutes les ressources humaines et matérielles en cas d'isolement du site.

Cela se traduit notamment par une organisation avec les pouvoirs publics ou intervenants extérieurs pour les besoins en déneigement de l'accès au site, par le choix des lieux de vie, l'approvisionnement de ressources en quantité suffisante pour permettre la restauration le repos et l'hygiène et par la définition d'un plan de circulation interne au CNPE.

Durant la phase de vigilance, (24 h avant le début prévisionnel du risque d'isolement du site), la vérification de disponibilité des agents nécessaires à l'exploitation, l'information des différents acteurs ou encore l'élaboration du plan de circulation interne sont les actions caractéristiques de cette phase.

Durant la phase de pré-alerte (12 h avant le début prévisionnel du risque d'isolement du site), l'astreinte de direction prévoit de mobiliser ou non les agents indispensables à l'exploitation des tranches, le risque d'isolement du site est apprécié selon une fiche d'aide à la décision. Elle se renseigne également des conditions de circulations dans les communes avoisinantes auprès des pouvoirs publics.

En cas de mobilisation des astreintes, il est nécessaire de s'assurer auprès des agents de leur arrivée avant le début d'isolement prévu, de mobiliser les moyens et le personnel pour assurer la disponibilité des lieux de vie.

Durant la phase de retour à la normale, l'exploitant prend des mesures pour assurer la sécurité du personnel et des installations vis-à-vis du risque neige (conservation du plan de circulation interne). Les astreintes sont démobilisées.

ORANO

La détérioration des conditions de travail et d'accès : ravitaillement des groupes de sauvegarde, accès particuliers, évacuation... est identifiée par ORANO comme un risque potentiellement lié aux précipitations, y compris solides comme la neige.

Le risque d'isolement du site a notamment été identifié et intégré dans le référentiel d'exploitation du site de La Hague, suite à l'épisode neigeux de mars 2013 (l'accès au site peut être difficile compte tenu de sa position à l'extrémité de la pointe du Cotentin). Ceci a, en particulier, conduit à réviser la gestion des moyens de transport (accès au site) et du personnel bloqué sur site, les dispositions étant précisées dans la documentation de gestion de crise. Le besoin d'identification du personnel restant sur site (locaux éloignés par exemple) et de leur maintien en situation sûre en cas d'évacuation massive a par ailleurs été précisé.

Pour le site du Tricastin, le risque d'enneigement est pris en compte pour les voies du site par la mise en place d'une astreinte neige pendant la période hivernale, qui permet d'assurer le déneigement de voies principales.

Par ailleurs, en cas d'isolement, il est à noter que la transmission des informations internes au site est durcie au travers de dispositifs de communication renforcés. Les exploitants de MELOX, La Hague et de la plate-forme du Tricastin disposent de moyens de communication autonomes satellitaires permettant un contact direct avec l'organisation nationale de crise ORANO et avec les Autorités de tutelle, permettant ainsi la diffusion de l'alerte en cas d'accident initié par des événements naturels extrêmes. Ces moyens sont intégrés au noyau dur.

ANDRA, CEA et FRAMATOME

L'ANDRA, le CEA et FRAMATOME n'ont pas apporté d'élément au sein du groupe de travail concernant les pratiques mises en œuvre sur leurs installations vis-à-vis de la problématique d'isolement du site en cas de chute de neige.

5.7.2.3. Lien avec l'organisation des pouvoirs publics

EDF

L'isolement de site est une situation interne au CNPE. En l'absence de situations accidentelles (déclenchement d'un PUI), aucune disposition particulière n'est mise en place par les pouvoirs publics pour débayer les voies d'accès et rétablir l'accès au CNPE. L'intervention des pouvoirs publics sera faite en fonction des disponibilités du personnel et des matériels. L'isolement de site n'engendre pas directement d'impact sur les populations, les pouvoirs publics n'interviendront pas prioritairement.

ORANO

En cas de risque d'isolement du site, un point régulier (2 fois par poste de 8 h à La Hague) entre la cellule de crise gréée à cette occasion et la Préfecture est effectué, ainsi qu'avec les exploitants nucléaires voisins pour coordonner les actions (Flamanville pour La Hague). Cet aspect est intégré dans le document de gestion de crise à La Hague.

L'ANDRA, le CEA et FRAMATOME n'ont pas apporté d'élément au sein du groupe de travail concernant les pratiques mises en œuvre sur leurs installations vis-à-vis des liens mis en œuvre avec l'organisation des pouvoirs publics en cas d'isolement du site suite à des chutes de neige.

5.7.2.4. Synthèse/Préconisation

La neige étant susceptible de rendre impossible momentanément les accès aux installations nucléaires de base, la possibilité d'un isolement du site est à prendre en compte dans la gestion de l'agression. Il est également nécessaire de prendre en compte le fait que certains événements neigeux peuvent durer plusieurs jours. La question de l'organisation avec les pouvoirs publics (mise en place de convention éventuelle...) devrait également être prise en compte, le cas échéant en coordination avec des exploitants nucléaires voisins.

5.7.3. Transports internes et travaux en extérieur

ORANO indique que les travaux en extérieur sont sécurisés ou suspendus. Les transports internes sont suspendus sauf si un itinéraire praticable peut être justifié (le cas échéant après déneigement).

Pour EDF, en cas de prévisions de neige et afin d'éviter tout accident de personnel, les chantiers sont arrêtés et mis en sécurité. Le personnel travaillant sur le CNPE et non nécessaire à la conduite des installations est invité à rentrer chez lui pour éviter de rester immobilisé sur le CNPE ou sur le réseau routier.

L'ANDRA, le CEA et FRAMATOME n'ont pas apporté d'élément au sein du groupe de travail concernant les pratiques mises en œuvre sur leurs installations vis-à-vis de la problématique des travaux en extérieur et des transports internes en cas de chute de neige.

5.7.4. Effets associés au verglas, à la pluie verglaçante et au givre

Les effets potentiels associés à la pluie verglaçante et au givre peuvent s'apparenter à ceux de la neige mais toucher d'autres cibles de sûreté. La prise en compte des effets de la neige et du vent permettrait de couvrir une partie des effets liés à ces phénomènes (obstruction de grilles, isolement du site, surcharge de structures ou d'équipement, etc.).

A noter que l'effet du givre et le risque de surcharge associé fait actuellement l'objet de la norme ISO 12494 (citée dans l'annexe C de l'Eurocode 1-3 relative aux pylônes et mat haubanés). Cette norme sera intégrée dans le prochain Eurocode, ce qui lui donnera un caractère d'application direct. Le rapport [14] dédie également un chapitre complet à ce sujet (§ 2.4 p53 et suivantes).

Le travail du GT n'a pas été au-delà de ces premiers éléments.

5.8. Conclusion / préconisations

En complément des préconisations présentées en partie 5.4.3, l'IRSN a proposé de préconiser la prise en compte des effets d'accumulations associés à des chutes de neige exceptionnelles au sens de la carte de l'AN de l'Eurocode 1-3. Il s'agit de considérer la situation (4) du cas B1 dans le tableau A.1 de l'annexe A de l'Eurocode 1-3. Ces accumulations sont à évaluer en tenant compte des niveaux de neige caractéristiques définis dans l'Eurocode 1-3 et non pas avec le niveau de neige de référence WENRA.

A noter que des dispositions de constructions ou de maintenance sont envisagées pour déneiger les toitures accessibles et ainsi diminuer la charge retenue dans les études de dimensionnement des toitures ou les hauteurs

de neige pouvant provoquer l'obstruction d'équipements. Les conditions de mise en œuvre et la faisabilité de telles actions nécessitent alors une justification au regard notamment des problématiques d'accessibilité et de cinétique du phénomène météorologique. Par ailleurs, les enjeux de sécurité pour les personnes en cas d'opération de déneigement manuel envisagé devraient être pris en compte.

Enfin, lorsque l'évaluation des effets de la neige sur l'installation nécessite de définir une hauteur de neige (cas du risque d'obstruction d'une grille de ventilation sans possibilité de déneigement par exemple), le GT propose de transposer les pratiques définies dans l'Eurocode 1-3, concernant les toitures attenantes à des constructions plus élevées ou très proches d'elles, puis de traduire les charges obtenues en hauteur de neige en considérant au maximum une densité de 150 kg/m³.

La suite de cette partie présente les commentaires que les membres du GT ont souhaité formuler sur cette proposition.

Éléments transmis par EDF le 31/09/2022 :

Concernant la prise en compte des accumulations, la démarche EDF consiste à ne pas considérer d'accumulations liées aux effets du vent pour le niveau de neige WENRA compte tenu de la faible probabilité d'avoir simultanément un épisode neigeux et des vents en capacité de déplacer des grandes quantités de neige. En revanche, il est pris en compte la part d'accumulation liée à des toitures attenantes plus élevées, le cas échéant et selon les prescriptions de l'Eurocode 1-3.

EDF indique être en désaccord avec cette proposition qui va au-delà de ce qui est exigé dans l'annexe nationale de l'Eurocode 1-3. La démarche EDF pour ces nouvelles constructions est cohérente avec l'annexe nationale française des Eurocodes (prescriptive) qui ne demande pas de prendre en compte le cas B1 sur les accumulations des neiges accidentelles en plaine.

Commentaires transmis par le CEA :

La situation « [4] accumulation » du cas B1 présentée dans le tableau A.1 de l'annexe A de l'Eurocode 1-3 est exclue explicitement par l'annexe nationale de cet Eurocode, « sauf si certaines conditions particulières d'exposition la justifient ».

Il est à noter que cette situation [4] d'accumulation lors de chutes exceptionnelles n'est possible que lorsque le vent peut permettre un déplacement de la neige. Le coefficient d'exposition C_e doit donc être pris égal à 1 (Clause 5.2(7) de l'annexe nationale). En effet, le coefficient d'exposition C_e égal à 1,25 (Clause 5.2(7) de l'annexe nationale) ne s'applique que lorsque les conditions « conduisent à empêcher pratiquement le déplacement de la neige par le vent » auquel cas les situations de chutes exceptionnelles sans accumulation doivent être appliquées.

Par conséquent, les « conditions particulières d'exposition » visées ci-dessus sont celles où le vent peut contribuer à une accumulation lors de chutes exceptionnelles. Ces conditions particulières d'exposition n'ont pas été abordées par le GT.

Par ailleurs, l'annexe nationale ayant remplacé la formule de la charge exceptionnelle de neige sur le sol fournie dans la clause 4.3 de l'Eurocode par les valeurs fournies dans la carte neige de l'annexe nationale, il convient de modifier la formule de la charge de neige exceptionnelle de la situation « [4] accumulation » du cas B1 présentée dans le tableau A.1 de l'annexe A de l'Eurocode 1 partie 1-3 par la formule présentée au b) de la clause 5.2 (3)P, c'est-à-dire : $s = \mu_i C_e C_{i,s} A_d$

Enfin, il est à noter que la charge exceptionnelle de neige sur le sol s_{Ad} est nulle dans les régions A1, C1 et E de la carte neige de l'Eurocode. Dans ces régions, la situation [4] d'accumulation lors de chutes exceptionnelles n'est donc pas à considérer.

Commentaire transmis par Ph. Delpech, CSTB le 01/12/2022 :

« il me semble irréaliste d'intégrer les pratiques de déneigement (humaines) [sur des toitures] dans une approche sécuritaire. Cette discussion avait d'ailleurs eu lieu au cours de l'une des conférences du snow engineering. Les Japonais, en particulier sont coutumiers d'intervention sur les toits des constructions en période hivernales. Mais, si une situation climatique extrême est observée, la garantie de disposer de ressources humaines pour ces tâches est questionnable. »

6. RÉFÉRENCES

- [1] Courrier ASN CODEP-DCN-2022-043346 / CODEP-DRC-2022-043347, 02/09/2022, « Toutes INB - Prise en compte des agressions naturelles externes liées à la neige et au vent dans la démonstration de sûreté »
- [2] Rapport IRSN N° 2021-00196 – Groupe de travail « Agressions externes » - Rapport de synthèse – Rapport élaboré conjointement par : IRSN, ANDRA, CEA, EDF, FRAMATOME, ORANO
- [3] Rapport WENRA - RHWG Report (2014): « Safety Reference Levels for Existing Reactors ».
- [4] Guide ASN - n°22, juillet 2017 - « Conception des réacteurs à eau sous pression ».
- [5] DTU P 06-002, février 2009 - « Règles NV 65 - Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions - Modificatif n°4 ».
- [6] Norme AFNOR - NF EN 1990, mars 2003 - « Eurocodes structuraux : Bases de calcul des structures » [Eurocode 0]. Aujourd'hui, On compte 60 Eurocodes, regroupés en 10 familles selon le découpage suivant : Eurocode 0: Bases de calcul des structures (EN 1990), Eurocode 1: Actions sur les structures (EN 1991), Eurocode 2: Calcul des structures en béton (EN 1992), Eurocode 3: Calcul des structures en acier (EN 1993), Eurocode 4: Calcul des structures mixtes acier-béton (EN 1994), Eurocode 5: Conception et calcul des structures en bois (EN 1995), Eurocode 6: Calcul des ouvrages en maçonnerie (EN 1996), Eurocode 7: Calcul géotechnique (EN 1997), Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes (EN 1998), Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium (EN 1999)
- [7] Avis IRSN/2017-00088, Risques liés aux tornades sur les installations d'AREVA, du CEA et d'EDF - Aléas à retenir pour les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur », mars 2017
- [8] Avis IRSN/2017-00087, Risques liés aux tornades sur les installations d'AREVA, du CEA et d'EDF – Méthodologie de prise en compte des effets sur les structures de génie civil et les équipements, mars 2017
- [9] [NRC Information Notice 2021-03 - Operating Experience Related to the Duane Arnold Energy Center Derecho Event on August 10, 2020](#) (page consultée le 22/06/2022)
- [10] Ousset, I., Evin, G., Raynaud, D., and Faug, T.: Back analysis of a building collapse under snow and rain loads in Mediterranean area, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-93>, in review, 2022
- [11] Projet de norme prEN 1990:2020 F, Eurocode - Bases des calculs structuraux et géotechniques, Septembre 2020 – *Document provisoire*
- [12] Final Draft EN 1991-1-3 Snow Loads, CEN/TC250/SC1 N 1469, Avril 2020 – *Document provisoire*
- [13] Updated Final Draft EN 1991-1-4 Wind actions, CEN-TC250/SC1 N 1512, Avril 2020 – *Document provisoire*
- [14] Final Draft Interdependence of climatic actions; Background document Probabilistic basis for determination of partial safety factors and load combination factors, CEN/TC 250/SC 1 N 1735, Avril 2021 – *Document provisoire*

- [15] Rapport CSTB, Julien Guilhot, 2005, EN-CAPE 05.157 L – V0, Simulation numérique des écoulements autour de reliefs complexes
- [16] Van der Hoven, I (1957). Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of meteorology*, vol14, p160-164
- [17] Compte-rendu IRSN PSE-ENV/SCAN-2022-00027 de l'échange avec Keraunos sur les rafales convectives du 23/03/2022
- [18] Rapport Météo-France, 2020, Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole
- [19] Rapport CSTB, Christian SACRE, Maeva SABRE et Jean-Paul FLORI, 2005, EN-CAPE 05.180 C-V3 Cartographie des vents extrêmes en France Métropolitaine
- [20] Davenport, A.G. (1964) Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading. *ICE Proceedings*, 28, 187-196.
- [21] Courrier ASN CODEP-DCN-2021-017553 / CODEP-DRC-2021-017735 du 27 mai 2021 « Aléas à retenir pour la protection des éléments importants pour la protection (EIP) à l'égard des tornades »
- [22] Fisher, R. et L. Tippett (1928). On the estimation of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*.
- [23] Archive Météo-France « l'épisode neigeux des 22,23 et 24 janvier 1992 dans le sud de la France » tiré des archives de J. Bietry.
- [24] C.M.D de Perpignan (1992) " Episode pluvio-neigeux du 22 au 24 janvier 1992 à Perpignan et Montpellier" Courrier Météo-France.
- [25] J.C. Deblaere (1991), L'épisode neigeux de décembre 1990 dans la région Rhône-Alpes, *La Houille Blanche*, 77:5, 333-338, [DOI: 10.1051/lhb/1991031](https://doi.org/10.1051/lhb/1991031).
- [26] Brun et al., 2012, La Météorologie "Le modèle de manteau neigeux Crocus et ses applications" DOI : [10.4267/2042/47245](https://doi.org/10.4267/2042/47245)
- [27] Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M.: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257–4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.
- [28] Croce et al. 2021 "Extreme Ground Snow Loads in Europe from 1951 to 2100" *Climate*. [doi:10.3390/cli9090133](https://doi.org/10.3390/cli9090133) .
- [29] Faranda (2020) "An attempt to explain recent changes in European snowfall extremes" *Weather Clim. Dynam.* [Doi: 10.5194/wcd-1-445-2020](https://doi.org/10.5194/wcd-1-445-2020).
- [30] D'Errico et al. (2020) "A dynamical and thermodynamic mechanism to explain heavy snowfalls in current and future climate over Italy during cold spells" *Earth System Dynamics Discussions* , European Geosciences Union/Copernicus Publ. [Doi: 10.5194/esd-2020-61](https://doi.org/10.5194/esd-2020-61).
- [31] Le Roux, E., Evin, G., Eckert, N., Blanchet, J., and Morin, S.: Elevation-dependent trends in extreme snowfall in the French Alps from 1959 to 2019, *The Cryosphere*, 15, 4335–4356, <https://doi.org/10.5194/tc-15-4335-2021>, 2021.
- [32] Le Roux, E., Evin, G., Eckert, N., Blanchet, J., and Morin, S.: Non-stationary extreme value analysis of ground snow loads in the French Alps: a comparison with building standards, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 2961–2977, [doi:10.5194/nhess-20-2961-2020](https://doi.org/10.5194/nhess-20-2961-2020), 2020.
- [33] Rapport Météo-France, Direction de la Production L. Dorel, J-M. Veysseire ; C. Canellas, juin 2010, Durée de retour des hauteurs de neige maximales en 24 heures pour 128 postes en France.

- [34]Rapport Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, C. Canellas, décembre 2019, Durée de retour des hauteurs de neige maximales en 24 heures pour 58 postes en France.
- [35]Calgaro, J.-A., Base fiabiliste des Eurocodes, Techniques de l'ingénieur. Février 2021.
- [36]Ducloux, H., Etude de la fiabilité structurale des pylônes treillis de lignes électriques aériennes soumises au vent. Revue Construction Métallique n°2-2020. CTICM.
- [37]NF EN 1990/NA : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures. Annexe Nationale à la NF EN 1990:2003. AFNOR. Décembre 2011.
- [38]NF EN 1990/A1 : Eurocode – Bases de calcul des structures. AFNOR. Juillet 2006.
- [39]NF EN 1990/A1/NA : Eurocode – Bases de calcul des structures – Annexe Nationale à la NF EN 1990/A1 :2006. AFNOR. Décembre 2007.
- [40]Note ORANO STD 7849 : Règles de conception, de dimensionnement et de vérification du génie civil, rev D.
- [41]Pickands, J. (1975). Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. *The Annals of Statistics* 3(1): 119-131.
- [42]Coles, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. London, Springer-Verlag.
- [43]Panagoulia D., Economou P. and Caroni C.: Stationary and nonstationary generalized extreme value modelling of extreme precipitation over a mountainous area under climate change. *Environmetrics* 2014; 25: 29–43.
- [44]Note EDF – D4550/2020-00458 ind. 0 du 29 février 2020 : « Titre de la note qui je l'espère ne sera pas trop long car sinon ce n'est pas beau ».
- [45]Rapport ORANO – 2019-002/58 ind.0 du 29 février 2020 : « Titre du rapport d'ORANO qui est super génial à lire ».
- [46]Vidal J.-P, Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Blanchard M., Soubeyroux J.-M. and Baillon M. (2010) Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, n° 5, p. 6455-6501. doi: 10.5194/hess-14-459-2010.
- [47]Durand, Y., M. Laternser, G. Giraud, P. Etchevers, B. Lesaffre, and L. Mérindol. 2009. "Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958–2002): Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48 (3): 429–49. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1808.1>.
- [48]Durand, Y., G. Giraud, M. Laternser, P. Etchevers, L. Mérindol, and B. Lesaffre. 2009. "Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48 (12): 2487–2512. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1810.1>.
- [49]Vernay, Matthieu, Matthieu Lafaysse, Pascal Hagenmuller, P. Nheili, Deborah Verfaillie, and Samuel Morin. 2019. *The S2M Meteorological and Snow Cover Reanalysis in the French Mountainous Areas (1958 - Present)*.
- [50]Vionnet, Vincent, Ingrid Dombrowski-Etchevers, Matthieu Lafaysse, Louis Quéno, Yann Seity, and Eric Bazile. 2016. "Numerical Weather Forecasts at Kilometer Scale in the French Alps: Evaluation and Application for Snowpack Modeling." *Journal of Hydrometeorology* 17 (10): 2591–2614. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0241.1>.
- [51]Krinner, Gerhard, Chris Derksen, Richard Essery, Mark Flanner, Stefan Hagemann, Martyn Clark, Alex Hall, et al. 2018. "ESM-SnowMIP: Assessing Snow Models and Quantifying Snow-Related Climate

- Feedbacks.” *Geoscientific Model Development* 11 (12): 5027–49. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-5027-2018>.
- [52] Lucas-Picher, Philippe, Daniel Argüeso, Erwan Brisson, Yves Trambly, Peter Berg, Aude Lemonsu, Sven Kotlarski, and Cécile Caillaud. 2021. “Convection-Permitting Modeling with Regional Climate Models: Latest Developments and next Steps.” *WIREs Climate Change* 12 (6): e731. <https://doi.org/10.1002/wcc.731>.
- [53] Caillaud, Cécile, Samuel Somot, Antoinette Alias, Isabelle Bernard-Bouissières, Quentin Fumière, Olivier Laurantin, Yann Seity, and Véronique Ducrocq. 2021. “Modelling Mediterranean Heavy Precipitation Events at Climate Scale: An Object-Oriented Evaluation of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model.” *Climate Dynamics* 56 (5): 1717–52. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>.
- [54] Fumière, Quentin, Michel Déqué, Olivier Nuissier, Samuel Somot, Antoinette Alias, Cécile Caillaud, Olivier Laurantin, and Yann Seity. 2020. “Extreme Rainfall in Mediterranean France during the Fall: Added Value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model.” *Climate Dynamics* 55 (1): 77–91. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8>.
- [55] Fiche Météo-France DP-SERV-BEC_2013_AleasClimIRSNVersion : 1.0, Consultation Aléas climatiques extrêmes pour l’IRSN - Aléas climatiques : généralités, 2014.
- [56] Note sur la simultanéité de la neige et du vent en plaine, présentée en commission du 15 mars 1974, J. Bedel.
- [57] Guide ASN 2/01, 26/05/2006, « Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil d’installations nucléaires de base à l’exception des stockages à long terme des déchets radioactifs ».
- [58] Règle fondamentale de sûreté n°2001.01, 31/05/2001, « Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface ».
- [59] Règles de conception et réalisation pour le génie civile des centrales nucléaires REP - Association Française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électronucléaires (afcen).
- [60] Norme DTU P 06-002, février 2009, « Règles Neige et Vent 65 - version 2009 (modificatif n°4) ».
- [61] Rapport IRSN n° 2021-00689, Modélisation des vents extrêmes – Etude comparative de différentes méthodes statistiques, novembre 2021.
- [62] Coles, S. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag London.
- [63] Hosking, J. R. M., and James R. Wallis. 1997. *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>.
- [64] Martins, Eduardo S., and Jerry R. Stedinger. 2000. “Generalized Maximum-Likelihood Generalized Extreme-Value Quantile Estimators for Hydrologic Data.” *Water Resources Research* 36 (3): 737–44. <https://doi.org/10.1029/1999WR900330>.
- [65] Hosking, J. R. M., J. R. Wallis, and E. F. Wood. 1985. “Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments.” *Technometrics* 27 (3): 251–61. <https://doi.org/10.1080/00401706.1985.10488049>.
- [66] Coles, Stuart G., and Jonathan A. Tawn. 1996. “A Bayesian Analysis of Extreme Rainfall Data.” *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 45 (4): 463–78. <https://doi.org/10.2307/2986068>.

- [67]P. Sagaut, «Introduction à la simulation des grandes échelles pour les écoulements de fluide incompressible», Springer-Verlag (1998).
- [68]L. Berselli, T. Iliescu, W. Layton, «Mathematics of Large Eddy Simulation of Turbulent Flows», Springer-Verlag, (2005).
- [69]CSTB G. J., Recalage climatique par simulation numérique - Comparaisons de approches Fluent, OpenFOAM et Topowind, 2011.
- [70]CSTB G. J., Recalage climatique par simulation numérique - Comparaisons de 3 codes et application à un cas réel, 2012.
- [71]Norme ANSI/ANS-2-3-2011, American Nuclear Society, “Estimating tornado, hurricane, extreme straight line winds characteristics at nuclear sites”, 2011.
- [72]Norme ASCE/SEI/7-10, American Society of Civil Engineers, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, 2010.
- [73]Preprint IAEA Safety Reports series N° 120, Assessment of high wind and external flooding (excluding tsunami) hazards in site evaluation for nuclear installations, AIEA 2022 – *Document provisoire*.
- [74]Ellingsen, O. (2021). Vortex-induced vibrations on industrial chimneys. Thèse de doctorat. Disponible sur <http://www.theses.fr/2021IPPAX061/document>.
- [75]INERIS, Guide de Bonnes Pratiques pour la réalisation de modélisations 3D pour des scénarios de dispersion atmosphérique en situation accidentelle - Rapport de synthèse des travaux du Groupe de Travail National, Ref : DRA-15-148997-06852A, juillet 2015.
- [76]Ricciardi L., Gélain T., Soares S., Experimental and numerical characterization of wind-induced pressure coefficients on nuclear buildings and chimney exhausts, Nuclear Engineering and Design, 292:248-260, DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.06.014.
- [77]A. Défossez et al., Protection of Nuclear Power Plants Against Severe Winds: Impact of the Local Building Configuration on the Wind Speed to Consider ; doi: <https://doi.org/10.1115/ICONE2020-16136>
- [78]Thèse Cedric Dall osso, 2012 Modélisation d'écoulements atmosphériques complexes par Large-Eddy Simulation (LES) à l'aide de Code Saturne.
- [79]C Flageul, and al. 2017, [Using Wall-Resolved Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow with Conjugate Heat Transfer to Estimate the Discontinuity of the Temperature Variance Dissipation Rate](#).
- [80]Oukacine et al, 2020, “Large Eddy Simulation for flows through emerged or slightly sub-merged square obstacles” River Flow 2020 -10th Conference on Fluvial Hydraulics, Jul 2020, DELFT, France. 8 p. fhal-02933751f.
- [81]Kraus et al, 2021 “Large Eddy Simulation of a 5 × 5 rod bundle: Impacts of a central control rod thimble tube”, Nuclear Engineering and Design, Volume 381, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111337>.
- [82]Farges et al, 2021 “Advanced benchmark of the flow through a mixing vane grid – Large eddy simulation validation”, Nuclear Engineering and Design, Volume 381, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111335>.
- [83]Guide CNC2M “Recommandations pour l’application de la NF EN 1997-1-4 aux charpentes et ossatures en acier de bâtiment », juillet 2017 (<https://www.bncm.fr/public/uploads/2020/04/CNC2M-N0380-REC-EC1-CM-Application-NF-EN-1991-1-4-Juillet-2017.pdf>).
- [84]Guide U.S. Nuclear Regulatory Commission - Regulatory Guide RG 1.76, Mars 2007 - « Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants ».

- [85] Guide U.S. Nuclear Regulatory Commission - Regulatory Guide RG 1.221, Octobre 2011 - « Design-basis hurricane and hurricane missiles for nuclear power plants ».
- [86] Report NUREG/CR-7004–Technical Basis for Regulatory Guidance on Design-Basis Hurricane–Borne Missile Speeds for Nuclear Power Plants–November 2011.
- [87] Simiu, E. et Scanlan, R.H. (1996). Wind Effects on Structures: Fundamentals and Application to design. New York, John Wiley and Sons. Ed. 3, 704 p.
- [88] Soares S., Gélain T. Irlès R., Ricciardi L. (2010) Projet TIVANO – Validation du code CFX pour l'étude de l'effet du vent sur des cheminées et des bâtiments d'installations nucléaires, rapport DSU/SERAC/LEMAC/10-19.
- [89] Klemeš, V. 2000. "Tall Tales about Tails of Hydrological Distributions. I." *Journal of Hydrologic Engineering* 5 (3): 227–31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:3\(227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(227)).
- [90] Klemeš, V. 2000. "Tall Tales about Tails of Hydrological Distributions. II." *Journal of Hydrologic Engineering* 5 (3): 232–39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:3\(232\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(232)).
- [91] Benito, Gerardo, Michel Lang, Mariano Barriendos, M. Carmen Llasat, Felix Francés, Taha Ouarda, Varyl Thorndycraft, et al. 2004. "Use of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods." *Natural Hazards* 31 (3): 623–43. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000024895.48463.eb>.
- [92] Carreau, Julie, Luc Neppel, Patrick Arnaud, and Philippe Cantet. 2013. "Extreme Rainfall Analysis at Ungauged Sites in the South of France: Comparison of Three Approaches." *Journal de la Société Française de Statistique* 154 (2): 119–38.
- [93] Burn, Donald H. 1990. "Evaluation of Regional Flood Frequency Analysis with a Region of Influence Approach." *Water Resources Research* 26 (10): 2257–65. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02257>
- [94] Le Roux, E. et al. 2020. Non-stationary extreme value analysis of ground snow loads in the French Alps: a comparison with building standards. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20(11), p. 2961-2977. DOI: 10.5194/nhess-20-2961-2020. <https://nhess.copernicus.org/articles/20/2961/2020/>.
- [95] O'Donnell, Frances C., John S. Tingerthal, and Steve White. 2020. "Estimation of Ground Snow Loads for Low-Latitude, High-Elevation Regions." *Journal of Cold Regions Engineering* 34 (2): 04020008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000209).
- [96] Calgaro J-A., Introduction aux Eurocodes – Sécurité des constructions et bases de la théorie de la fiabilité, 1996.
- [97] Commission of the European Communities DGIII – D3, March 1998, Scientific support activity in the field of structural stability of engineering works snow load.
- [98] Rapport Biétry J, Charges de neige au sol en France : proposition de carte révisée, 23 mai 2005.
- [99] O'Donnell, F.C., Tingerthal, J.S. et White, S., 2020. Estimation of Ground Snow Loads for Low-Latitude, High-Elevation Regions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 34(2), p. 04020008, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CR.1943-5495.0000209>.
- [100] Rapport Météo-France, Service Central d'exploitation de la météorologie, « Durée de retour des épaisseurs maximales quotidiennes de la couche de neige », octobre 1993.
- [101] Rapport Météo-France Direction Interrégionale Nord-Est, janvier 2014, Etude des durées de retour de charge de neige pour 17 stations météorologiques françaises, étude réalisée pour EDF R&D Management des risques industriels.

- [102] Ducloux, H. and Nygaard, B. E., 2014, 50-year return-period wet-snow load estimation based on weather station data for overhead line design in France, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 3031–3041, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3031-2014>.
- [103] Note technique Météo-France, mise à jour novembre 2014, « N° 35B Classification d'un site ».
- [104] Guide AIEA, Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.10, IAEA, Vienna (2004).

7. GLOSSAIRE DES NOTIONS ET NOTATIONS DES EUROCODES

Ce glossaire vise principalement à expliquer les notions et notations retenues dans les Eurocodes. Pour mémoire, les notations relatives :

- aux actions d'une manière générale sont notées avec la lettre **F**,
- aux actions permanentes sont notées avec la lettre **G**,
- aux actions variables sont notées avec la lettre **Q**,
- aux actions accidentelles sont notées avec la lettre **A**.

Les textes encadrés en noir sont directement issus de l'Eurocode 0 (EN1990 :2002) [6]

Le cas échéant, un second encadré en bleu présente l'évolution prévue dans le projet de nouvel Eurocode 0 [11].

État limite :

états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux critères de dimensionnement pertinents

En conséquence, il s'agit des états auxquels la structure ne répond pas aux exigences auxquelles elle doit répondre sauf démonstration complémentaire.

États limites de service (ELS) :

états correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service spécifiées pour une structure ou un élément structural ne sont plus satisfaites

Ils sont liés aux conditions d'exploitation et à la durabilité recherchées pour l'ouvrage de façon à limiter les phénomènes de :

- Déformations (aspect, confort, fonctionnalité, ...)
- Vibrations (confort, efficacité fonctionnelle, ...)
- Dommages nuisibles (aspect, durabilité, fonction, ...)

États limites ultimes (ELU) :

états associés à un effondrement ou à d'autres formes similaires de défaillance structurale

NOTE Cette notion correspond généralement à la capacité portante maximale d'une structure ou d'un élément structural.

L'exigence de non-effondrement a pour objectif d'éviter de mettre en danger la sécurité des personnes et/ou des biens. Elle repose sur 3 types de vérification, vis-à-vis de :

- une perte d'équilibre
- une perte de stabilité (rupture locale ou globale, instabilité)
- une défaillance causée par la fatigue

Action (F) :

- a) Ensemble de forces (charges) appliquées à la structure (action directe) ;
- b) Ensemble de déformations ou accélérations imposées, résultant par exemple de changements de température, de variations du taux d'humidité, de tassements différentiels ou de tremblements de terre (action indirecte).

Action permanente (G) :

action qui a de fortes chances de durer pendant toute une durée de référence donnée et dont la variation dans le temps est d'ampleur négligeable, ou dont la variation se fait toujours dans le même sens (monotone) jusqu'à ce que l'action atteigne une certaine valeur limite

Il s'agit par exemple du poids propre des structures, des terres, ...

Action variable (Q) :

action dont la variation dans le temps n'est d'ampleur ni négligeable ni monotone

action susceptible de se produire au cours de la durée d'utilisation du projet et dont la variation de la grandeur au fil du temps n'est ni négligeable, ni monotone

Il s'agit par exemple des charges d'exploitation (charge roulante, charge levée par pont roulant, fluides, ...), de neige, de vent, ...

Action accidentelle (A) :

action, habituellement de courte durée mais de grandeur significative, qui a peu de chances d'intervenir sur une structure donnée au cours de sa durée de vie de projet

NOTE 1 Dans de nombreux cas, une action accidentelle est susceptible d'avoir de graves conséquences si des mesures appropriées ne sont pas prises.

NOTE 2 Un choc, la neige, le vent et les actions sismiques peuvent être des actions variables ou accidentelles, en fonction des informations disponibles sur les distributions statistiques.

L'Eurocode ne définit pas de valeur de vent accidentel.

Pour certaines zones de la métropole une charge de neige exceptionnelle a été définie pour couvrir des records exceptionnels observés⁷⁴. L'annexe nationale de l'Eurocode demande de traiter les charges exceptionnelles de neige comme des actions accidentelles.

Valeur caractéristique d'une action (F_k) :

⁷⁴ Cf. par exemple cf.4.3.2 »Cas particulier des charges de neige du livre de J-A. Calgaro « 21 éléments de fiabilité des constructions – Introduction aux Eurocodes », p 88 à 90

principale valeur représentative d'une action

NOTE Dans la mesure où elle peut reposer sur des bases statistiques, la valeur caractéristique est choisie pour correspondre à une probabilité donnée de non-dépassement du côté défavorable, au cours d'une «durée de référence» tenant compte de la durée d'utilisation de projet de la structure et de la durée de la situation de projet.

valeur d'une action choisie, dans la mesure où elle peut être fixée sur une base statistique, pour correspondre à une probabilité donnée de sorte à ne pas être dépassée défavorablement au cours d'une période de référence déterminée

- Valeur caractéristique d'une action permanente (G_k) :

Elle doit être déterminée de la façon suivante :

- si la variabilité de G peut être considérée comme faible, une valeur unique de G_k peut être utilisée : c'est le cas du poids propre des structure ;
- si la variabilité de G ne peut pas être considérée comme faible, deux valeurs doivent être utilisées : une valeur supérieure $G_{k,sup}$ et une valeur inférieure $G_{k,inf}$: c'est le cas des actions de précontraintes.

- Valeur caractéristique d'une action variable (Q_k):

Pour les actions variables, la valeur caractéristique doit correspondre :

- soit à une valeur correspondant à une probabilité recherchée pour ne pas être dépassée du côté des valeurs défavorables pendant une certaine durée de référence ;
- soit à une valeur nominale, qui peut être spécifiée dans des cas où il n'existe pas de distribution statistique connue.

NOTA : pour mémoire, dans l'Eurocode, la valeur caractéristique des actions climatiques est basée sur une probabilité de 0,02 de dépassement de leur partie variable avec le temps, au cours d'une durée de référence d'un an, ce qui équivaut à une période moyenne de 50 ans.

Valeur de combinaison d'une action variable ($\Psi_0 Q_k$) :

valeur choisie, pour autant qu'elle puisse être déterminée sur des bases statistiques, de sorte que la probabilité de dépassement des effets causés par la combinaison soit à peu près la même que pour la valeur caractéristique d'une action individuelle. Elle peut être exprimée comme une fraction déterminée de la valeur caractéristique en utilisant un facteur $\psi_0 \leq 1$

Q_{comb}

valeur d'une action d'accompagnement, à utiliser pour la vérification des états limites ultimes des situations de projet durables ou transitoires et des états limites de service irréversibles, choisie (pour autant qu'elle puisse être déterminée sur des bases statistiques) de sorte que la probabilité de dépassement des effets causés par la combinaison soit à peu près la même que pour la valeur caractéristique d'une action individuelle

Note 1 à l'article : Q_{comb} peut être exprimé sous forme de fraction ψ_0 de la valeur caractéristique (c'est-à-dire $Q_{comb} = \psi_0 Q_k$) où $\psi_0 \leq 1$.

Cette valeur est utilisée lorsqu'on envisage l'occurrence de plusieurs actions variables simultanément, sachant que la probabilité de voir ces deux actions atteindre simultanément des valeurs proches de leurs valeurs caractéristiques est très faible.

Valeur fréquente d'une action variable ($\Psi_1 Q_k$) :

valeur déterminée, pour autant qu'elle puisse l'être sur des bases statistiques, de manière que la durée totale, au cours de la durée de référence, pendant laquelle elle est dépassée, ne représente qu'une petite fraction donnée de la durée de référence, ou que la fréquence de son dépassement soit limitée à une valeur donnée. Elle peut être exprimée comme une fraction déterminée de la valeur caractéristique en utilisant un facteur $\psi_1 \leq 1$

Q_{freq}

valeur utilisée pour la vérification des états limites ultimes impliquant des actions accidentelles et pour la vérification de certains états limites de service réversibles

Note 1 à l'article : Q_{freq} peut être exprimé sous forme de fraction ψ_1 de la valeur caractéristique (c'est-à-dire $Q_{\text{freq}} = \psi_1 Q_k$), où $\psi_1 \leq 1$

Pour les bâtiments, par exemple, la valeur fréquente est choisie telle que le temps de dépassement corresponde à 0,01 de la durée de référence (cf. ECO §4.1.3).

Valeur quasi-permanente d'une action variable ($\Psi_2 Q_k$) :

valeur déterminée de manière que le temps total pendant lequel elle sera dépassée représente une fraction considérable de la durée de référence. Elle peut être exprimée comme une fraction déterminée de la valeur caractéristique en utilisant un facteur $\psi_2 \leq 1$

Q_{qper}

valeur utilisée pour la vérification des états limites ultimes impliquant des actions accidentelles ou sismiques, pour la vérification de certains états limites de service réversibles et dans le calcul des effets à long terme

Note 1 à l'article : Q_{qper} peut être exprimé sous forme de fraction ψ_2 de la valeur caractéristique (c'est-à-dire $Q_{\text{qper}} = \psi_2 Q_k$), où $\psi_2 \leq 1$.

Valeur qui représente une intensité très souvent atteinte, utilisée pour la vérification d'états-limites ultimes impliquant des actions accidentelles et pour la vérification d'états-limites de services réversibles. Les valeurs quasi-permanentes sont également utilisées pour le calcul d'effets à long terme. Pour les charges appliquées sur les planchers de bâtiments, la valeur quasi-permanente est habituellement choisie pour que le temps de dépassement représente la moitié de la durée de référence. La valeur quasi-permanente peut-être également déterminée comme la valeur moyennée sur une durée choisie. Dans le cas d'actions du vent, cette valeur est généralement prise égale à zéro (cf. l'ECO §4.1.3)

Valeur représentative (F_{rep}) :

valeur utilisée pour la vérification d'un état-limite. Une valeur représentative peut être la valeur caractéristique (F_k) ou une valeur d'accompagnement (ψF_k)

Valeur de calcul d'une action (F_d) :

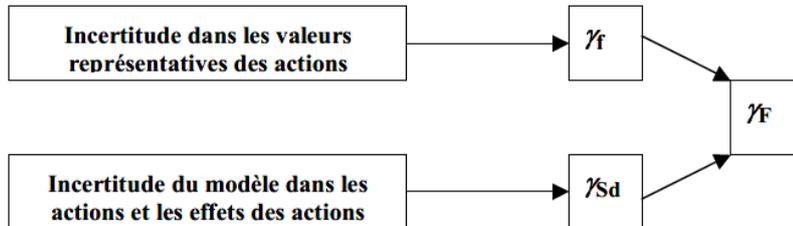
valeur obtenue en multipliant la valeur représentative par le coefficient partiel γ_f

NOTE Le produit de la valeur représentative par le coefficient partiel $\gamma_F = \gamma_{\text{sd}} \times \gamma_f$ peut être également désigné comme la valeur de calcul de l'action (voir 6.3.2).

valeur obtenue en multipliant la valeur représentative d'une action par un coefficient partiel γ_F ou déterminée directement

Avec ;

- γ_F Coefficient partiel pour actions, tenant aussi compte d'incertitudes de modèle et de variations dimensionnelles
- γ_f Coefficient partiel pour actions, tenant compte de la possibilité d'écarts défavorables des valeurs des actions par rapport aux valeurs représentatives
- γ_{Sd} Coefficient partiel associé à l'incertitude de modèle des actions et/ou de leurs effets



Dans la pratique usuelle pour les vérifications aux états limite ultimes en situation de projet durable ou transitoire (situation normale d'exploitation) :

- la valeur de calculs des actions permanentes est obtenue en utilisant un coefficient partiel $\gamma_F = \gamma_G = 1,35$
- la valeur de calculs des actions variable est obtenue en utilisant un coefficient partiel $\gamma_F = \gamma_Q = 1,5$

Dans la pratique usuelle pour les vérifications aux états limite ultimes en situation de projet accidentelles :

- la valeur de calculs des actions permanentes est obtenue en utilisant un coefficient partiel $\gamma_F = \gamma_G = 1$
- la valeur de calculs des actions variables est obtenue en utilisant un coefficient partiel $\gamma_F = \gamma_Q = 1$

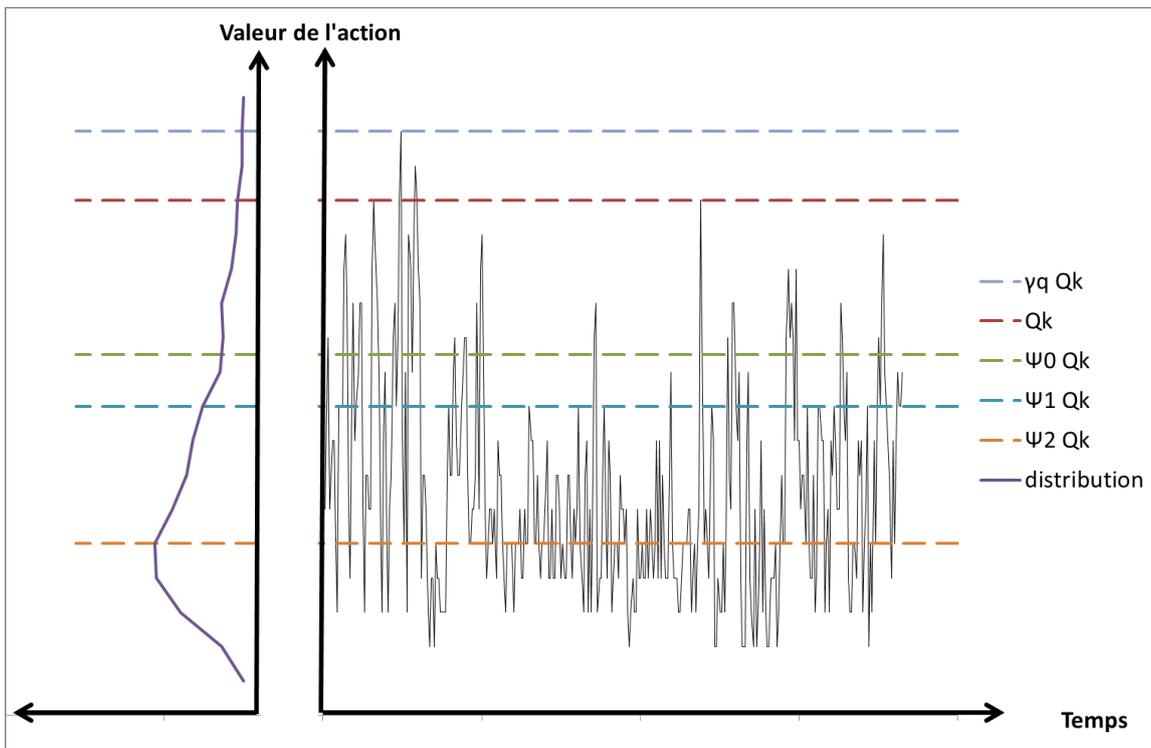


Figure 47 : Illustrations des différentes valeurs représentatives d'une action variable

ANNEXES

Annexe 1. Situations de référence pour le risque d'origine naturel (SRN) et terminologie du rapport « GT Agressions naturelles inter-exploitants »	166
Annexe 2. Retour d'expérience sur les sites nucléaires en lien avec des phénomènes initiateurs vent ou neige.....	169
Annexe 3. Contribution complémentaire de Météo-France	181
3.1. L'observation de surface (in situ)	181
3.1.1. Réseaux propriétaires de Météo-France	181
3.1.1.1. Réseau RADOME	181
3.1.1.2. Réseau Climatologique d'État (RCE)	182
3.1.2. Réseaux en partenariat	182
3.1.3. Réseaux d'Intérêt Commun (RIC)	183
3.1.4. Cas particulier du Réseau SEMENCE	183
3.1.5. Métadonnées	185
3.1.5.1. Type de station	185
3.1.5.2. Classe environnementale	185
3.2. Capteurs utilisés pour la mesure du vent et de la neige	189
3.2.1. Capteurs dédiés à la mesure du vent	189
3.2.2. Capteurs dédiés à la mesure de la neige	190
3.2.2.1. Les observations automatiques	190
3.2.2.2. Les différents capteurs sur les stations Météo-France.....	191
3.3. Base de données climatologiques de Météo-France (BDClm).....	194
3.3.1. Contrôles qualité / codes qualité	194
3.3.1.1. Filtres	194
3.3.1.2. Contrôles automatiques.....	194
3.3.2. Paramètres vents disponibles	194
3.3.3. Paramètres neige disponibles	195
3.3.4. Accès aux données.....	196
3.4. Dispositif d'alerte : la Vigilance météorologique.....	196
3.4.1. Un dispositif d'avertissement sur les dangers météorologiques.....	196
3.4.2. 4 niveaux de vigilance pour 9 phénomènes	197
3.4.3. Des bulletins de vigilance	198
3.4.4. Où trouver la carte de vigilance ?	198
3.4.5. Partenaires de la Vigilance	198
3.4.6. Performance de la vigilance	199
Annexe 4. Mesures de vent existantes sur les sites nucléaires	202
4.1. Récapitulatif des mesures faites sur les stations météorologiques des sites nucléaires.....	202
4.2. ANDRA - Centre de stockage de la Manche (Digulleville).....	202
4.3. ANDRA – Centre de Stockage de l'Aube (Soulaines-Dhuys)	204
4.4. CEA - Cadarache	205
4.5. EDF	207
4.6. ORANO – La Hague.....	208
4.7. FRAMATOME – Romans-sur-Isère	209
4.8. ANDRA - Projet Cigéo (Meuse / Haute-Marne)	210
4.8.1. Contexte du site et des installations	210
4.8.2. Documentation	211
4.8.3. Localisation et environnement immédiat	211
4.8.4. Système de mesures	213
4.8.5. Base de données	214
Annexe 5. Analyse des records de vent : méthode de normalisation retenue	215
5.1. Concept	215
5.2. Exemples d'application	215
5.3. Limites	216

Annexe 6. Analyse des records de neige	217
Annexe 7. Exigence de comportement des structures de génie civil définies par les exploitants ...	218
7.1. Exigences définies dans le référentiel du CEA	218
7.2. Exigences définies dans le référentiel ORANO	219
7.3. Exigences définies dans le référentiel EDF	221
7.4. Exigences définies dans le référentiel Framatome	223
Annexe 8. Combinaisons d’actions retenues par les exploitants pour l’étude des états limites ultimes (ELU)	224
8.1. Combinaisons d’actions définies par le CEA	224
8.2. Combinaisons d’actions définies par ORANO	225
8.3. Combinaisons d’actions retenues par EDF	227
Annexe 9. Eléments généraux sur la théorie des valeurs extrêmes	230
9.1. Fondements théoriques	230
9.2. Limites et précautions pour l’application aux variables hydrométéorologiques	230
9.3. Estimation des valeurs extrêmes.....	231
Annexe 10. Aspects théoriques associés à la simulation CFD.....	233
10.1. Système des équations de Navier-Stokes.....	233
10.2. Echelles de turbulence	233
10.3. Analyse dimensionnelle.....	234
Annexe 11. Etude EDF à l’échelle d’un site nucléaire en considérant l’objectif de caractérisation des effets des vents forts	236
Annexe 12. Projectiles considérés aux USA pour les Ouragans - Analyse du Regulatory Guide 1.221 de l’USNRC	239
12.1. Examen du Regulatory guide 1.221.....	239
12.2. Examen du rapport NUREG/CR-7004	239
12.3. Position CEA vis-à-vis du projectile « Bille d’acier »	240
Annexe 13. Prise en compte du risque de survitesse des ventilateurs en cas de vents extrêmes par EDF.....	243
Annexe 14. Coefficients de forme des toitures simples définies dans l’Eurocode 1-3 – cas des coefficients de forme des toitures simples (à versants) et cylindrique.....	245
14.1. Coefficient de forme des toitures simples.....	245
14.1.1. Toitures à un seul versant	245
14.1.1.1. Toitures à deux versants	245
14.1.1.2. Toitures à versants multiples	246
14.1.2. Evolution de l’Eurocode 1-3 pour les toitures simples	247
14.2. Toitures cylindriques	250
14.2.1. Version actuelle de l’Eurocode 1-3.....	250
14.2.2. Projet d’évolution de l’Eurocode 1-3 pour les toitures cylindriques et les dômes	252

Annexe 1. Situations de référence pour le risque d'origine naturel (SRN) et terminologie du rapport « GT Agressions naturelles inter-exploitants »

Cette annexe reprend des extraits du rapport « GT Agressions naturelles inter-exploitants » de mars 2021 afin de contextualiser le cadrage des travaux du GT Vent et Neige.

« de manière cohérente avec la définition des SRI (situations de référence à prendre en compte pour le risque d'inondation) dans le cadre du guide n°13 de l'ASN relatif aux inondations externes⁷⁵, le GT a défini la notion de situation de référence pour le risque d'origine naturel (SRN) en généralisant celle de SRI.

Une SRN :

représente un événement ou une situation, d'origine naturelle, à prendre en compte pour évaluer les effets potentiels de l'agression externe d'origine naturelle concernée dans le domaine de conception « de référence » d'une INB. Chaque SRN est définie au regard de ses effets sur l'INB. La démarche requiert donc, au préalable de son établissement, une identification adéquate des effets des agressions sur les SSC⁷⁶ à prendre en compte dans l'évaluation. Pour certaines agressions il sera nécessaire de définir plusieurs SRN, afin de couvrir l'ensemble des effets potentiels⁷⁷, tandis que pour d'autres, une unique SRN sera suffisante ;

est définie :

soit par un événement naturel unique (par exemple : canicule, vague de froid...);

soit par une conjonction d'événements naturels. Dans ce cas, il peut s'agir d'événements indépendants ou d'événements ayant une corrélation (par exemple : dépendance, concomitance...);

est caractérisée par une intensité (définie par une ou plusieurs grandeurs physiques⁷⁸) et, lorsque pertinent, par une durée. L'intensité d'une SRN correspond à celle de fréquence annuelle de dépassement estimée conforme à la préconisation détaillée ci-dessus. Lorsque la SRN est définie par une conjonction d'événements, la fréquence annuelle de dépassement de cette conjonction peut être plus rare que celle maximale indiquée par cette recommandation pour couvrir les limites des connaissances actuelles et atteindre ce degré de confiance suffisant⁷⁹.

L'ensemble des éléments à prendre en compte pour l'évaluation des effets sur les SSC de l'installation dans le cadre de la démonstration de sûreté au regard des agressions externes, y compris ceux des SRN, sont schématisés ci-après. »

⁷⁵ Guide ASN n° 13, 2013, Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes.

⁷⁶ Systèmes, structures et composants.

⁷⁷ C'est le cas par exemple pour l'inondation externe ou les différentes SRI, ont été définies pour couvrir l'ensemble des effets potentiels.

⁷⁸ Température, hauteur d'eau, enthalpie...

⁷⁹ À titre d'exemple, pour l'inondation externe, une situation « clapot » a été définie dans le guide ASN n° 13 par la conjonction d'un vent centennal et d'une crue fluviale millénale (les 2 phénomènes étant alors considérés comme indépendants). Cette situation a été considérée la plus pertinente par les experts pour rendre compte de l'effet de franchissement d'ouvrages de protection : le calcul des effets de cette seule SRI est ainsi considéré suffisant pour couvrir tous les « dosages » entre crue fluviale et vent associé pouvant former un clapot et provoquer des franchissements.

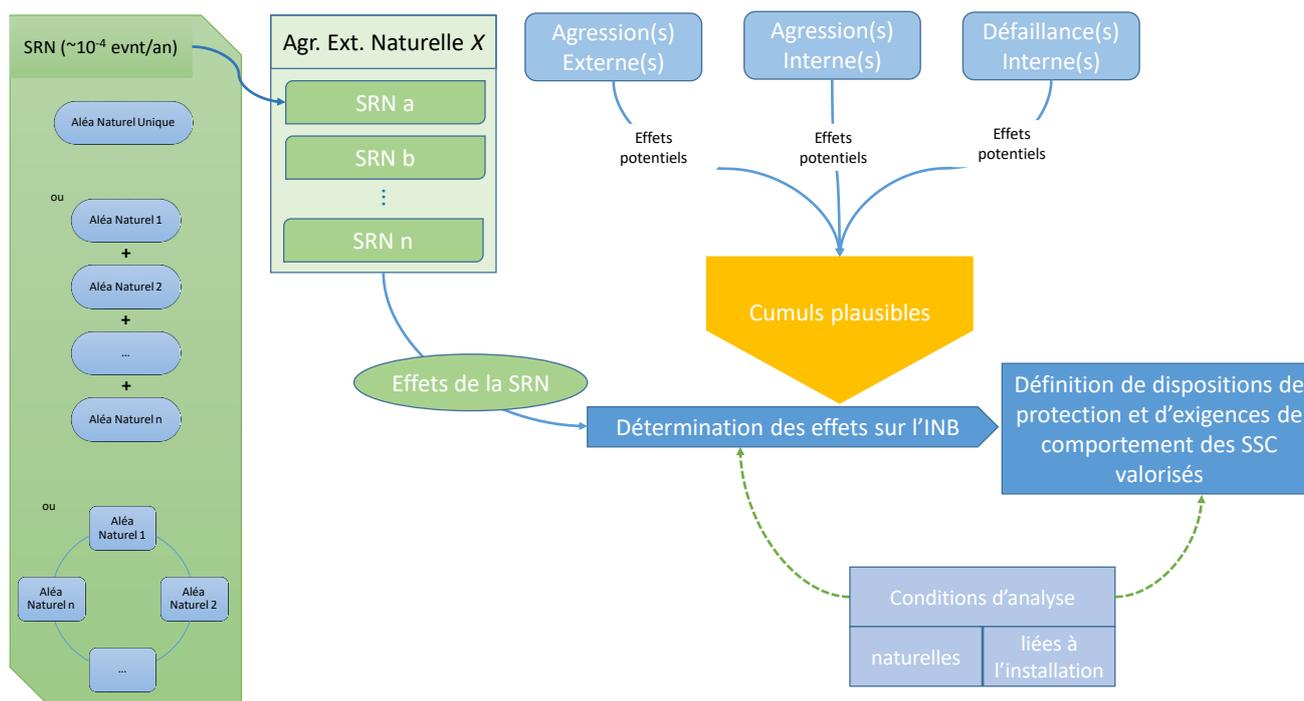


Figure 48 : Schéma récapitulatif de la démarche de prise en compte des agressions naturelles

La notion de « cumul » a également été définie par le GT agression externe en lien avec celle de SRN :

Une SRN est définie au regard de ses effets sur l'INB (charges de neige, effets directs du vent...). Le GT a convenu que l'expression « cumuls plausibles » devait être utilisée pour une autre agression externe ayant a priori un effet différent de celui de la SRN considérée, une agression interne ou un événement déclencheur issu de défaillance(s) interne(s). Il peut être noté que :

- *cette définition n'est pas basée sur la notion de dépendance/indépendance des événements déclencheurs ;*
- *pour les événements naturels, une distinction est faite entre le terme « conjonction », utilisé pour des événements ayant le même effet et définissant donc la SRN, et le terme « cumuls » utilisé pour des événements ayant a priori un effet différent.*

En complément des effets de la SRN, dans le cadre de la démonstration de sûreté nucléaire au regard des agressions, sont considérés :

- *les cumuls plausibles de l'agression externe naturelle considérée avec d'autres agressions externes, des agressions internes ou des événements déclencheurs issus de défaillance(s) interne(s). Dans le cas présent, l'expression « cumul plausible » est utilisée pour une autre agression externe ayant a priori un effet différent de celui de la SRN considérée, une agression interne ou un événement déclencheur issu de défaillance(s) interne(s) ;*
- *des « conditions d'analyse » pouvant influencer sur le comportement des SSC soumis aux effets de la SRN considérée. Il s'agit :*
 - *des conditions d'origine naturelle (par exemple : les actions climatiques autres que celles considérées dans la SRN comme la température extérieure, le niveau de nappe phréatique...);*
 - *des conditions liées à l'installation (par exemple : le poids propre des structures et équipements, la température et la pression d'exploitation dans les locaux...).*

Ces « conditions d'analyse » sont prises en compte dans la phase de détermination des effets de l'agression sur l'installation ou dans celle de définition des dispositions de protection au regard des agressions.

A noter la terminologie suivante a été adoptée par le GT agressions externes « *Le niveau d'aléa à prendre en compte dans la démonstration de sûreté se compose de la façon suivante :*

- *d'un niveau d'aléa qu'il est possible de quantifier avec un niveau de confiance suffisant estimé sur la base des données disponibles (historique des mesures...);*
- *des incertitudes associées à l'estimation de ce niveau quantifiable (par exemple : considération de la borne supérieure de l'intervalle de confiance du niveau estimé);*

si besoin :

- *d'une pénalité pour couvrir la part non quantifiable avec un niveau de confiance suffisant du niveau d'aléa ou des incertitudes (par exemple : majoration de +15 % appliquée à la crue millénale pour définir la « Crue Millénale Majorée » jugée équivalente à une crue décennale, majoration de 2 °C appliquée à la température centennale pour définir la température décennale),*
- *d'une provision pour couvrir l'évolution pressentie (par exemple : prise en compte de l'impact du changement climatique sur le niveau d'aléa au cours de la vie de l'installation). Cette évolution peut couvrir des durées diverses mais la durée ne peut être inférieure à la durée jusqu'à la réévaluation suivante du niveau d'aléa.*

La marge au regard de l'aléa est l'écart entre le niveau d'aléa ainsi défini et le niveau d'aléa utilisé pour la définition des protections. »

Concernant l'usage des périodes de retour, une précision donnée dans le rapport du GT Agressions externes est utile à rappeler : « *dans le contexte des études probabilistes, un événement de « période de retour » 100 ans (ou 1000 ans ou 10000 ans), dit aussi événement centennal (respectivement millénal ou décennal), est un événement qui reviendrait en moyenne tous les 100 ans (respectivement 1000 ans ou 10000 ans) et non pas un événement qui se reproduirait systématiquement tous les 100 ans. Cette appellation est fréquemment utilisée par les exploitants et l'IRSN mais est ambiguë, d'autant plus dans un contexte d'évolution climatique. Il serait donc préférable d'utiliser l'expression « fréquence annuelle de dépassement » (10^{-2} /an pour du centennal, 10^{-3} /an pour du millénal, 10^{-4} /an pour du décennal, etc.) même si en pratique les deux expressions sont utilisées et désignent la même notion. ».*

Annexe 2. Retour d'expérience sur les sites nucléaires en lien avec des phénomènes initiateurs vent ou neige.

Les exploitants participant au GT ont recensé le retour d'expérience issu de leurs installations en lien avec des événements dont l'initiateur est le vent ou la neige. Ceux-ci sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

A noter qu'EDF n'a pas fait de recherche complète pour le vent mais recherché si un Événement Significatif pour la sûreté (ES) était identifié lors des jours de tempêtes. Les dates de tempêtes ont été extraites des 98 fiches tempêtes de Météo-France pour la période 1968 jusqu'en 2020, en retenant le critère d'une vitesse de rafale supérieure à 100 km/h sur une partie significative du territoire (plus de détail sous <http://tempetes.meteo.fr/spip.php?article204>).

L'ANDRA a recensé en plus des ES, les EIS (Événement intéressant la Sûreté) et les EIE (Événements intéressant l'Environnement). FRAMATOME a recherché dans la Base « MAEVA » qui existe depuis 2011 (pas d'autre événement retrouvé qu'un orage et un épisode neigeux en 2019). Le CEA a également collecté les événements sur les sites de Marcoule et Valduc. Quelques événements anciens relevés par l'IRSN dans les référentiels des sites nucléaires (dits PGSE, PG2S...) ont également été ajoutés.

Tableau 19. Retour d'expérience sur les sites nucléaires en lien avec un phénomène initiateur de type vent

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Événement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	23-nov-83	Gravelines	V = 41 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Indisponibilité/perturbation réseau avec ou sans impact sur le process Gravelines 3 : Forte variation de puissance active et réactive due à un coup de réseau. Pas de conséquence sûreté. Gravelines 2 : Ilotage de la tranche depuis 100 % PN à la suite d'un défaut réseau généralisé. Conséquence : ilotage de la tranche. Pas de conséquence sûreté Gravelines 1 : Ilotage de la tranche depuis 100 % PN suite à un défaut réseau généralisé. Conséquence : défaut réseau généralisé et ilotage de la tranche. Pas de conséquence sûreté Gravelines 4 : Ilotage réussi dû à un à coups réseau. La protection a conduit à l'ilotage. Pas de conséquence sûreté	
EDF	08-févr-84	Bugey	V < 30m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Perte alimentation électrique auxiliaire (225kV). Pas de conséquence sur la sûreté.	
EDF	24-mars-86	Saint-Laurent	V < 30m/s	?	Indisponibilité de 40 MW en raison de conditions atmosphériques (vent violent). Pas de conséquences sur la sûreté.	
EDF	16-oct-87	Flamanville	V = 50 m/s (V = 50 m/s à Paluel, sans rex particulier)	Perte de l'alimentation électrique externe	Flamanville 1 : Ilotage fortuit réussi depuis 100 % Pn suite à défaut sur le réseau. Flamanville 2 : Arrêt réacteur par variation de flux élevée suite à défaut de réseau suite à un ilotage raté.	
EDF	16-oct-87	Gravelines	V = 34 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	à-coups réseau très nombreux suite aux conditions climatiques.	
EDF	25-janv-90	Paluel	Rafale de vent max mesurée à la station de référence de 43 m/s.	Dégradation de structure ou d'équipement	Chute de la partie supérieure de la cheminée du BAN Conséquences réelles sur la sûreté : Pas de conséquences sur la sûreté. Dégât sur la toiture du BAN et perte des mesures de débit de ventilation à la cheminée.	

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	25-janv-90	Gravelines	Forte rafale de vent sur le site de Gravelines	Perte de l'alimentation électrique externe	Arrêt réacteur par suite de variations importantes de la puissance active dues à des avaries sur une ligne 400kv causées par une tempête. Perte de ligne 400 kv par protection ligne. Pas d'impact sur la sûreté.	
EDF	03-févr-90	Saint-Laurent	Saint-Laurent B : 34 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Indisponibilité/perturbation réseau avec ou sans impact sur le process Saint Laurent B : Perte de la source externe auxiliaire pendant la violente tempête. La perte de la ligne est due à la chute d'un arbre sur celle-ci.	
EDF	03-févr-90	Nogent	Nogent : < 30 m/s,	Perte de l'alimentation électrique externe	Indisponibilité/perturbation réseau avec ou sans impact sur le process Nogent 1 : le vent fait osciller les câbles 400kv qui s'approchant trop près du pylône de soutènement, provoquent un amorçage ligne/pylône. Plusieurs basculements TS-TA ont eu lieu. La tranche est restée finalement sur le TA jusqu'à la fin de la tempête. Nogent 2 : Arrêt réacteur par basse vitesse des pompes primaires. La tempête a provoqué la mise hors tension de la plateforme GEV	
EDF	03-févr-90	Cattenom	Cattenom : 40 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Indisponibilité/perturbation réseau avec ou sans impact sur le process Cattenom 1 : Défaut réseau et déclenchement TA.	
EDF	27-févr-90	Dampierre	< 30 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Dampierre 8 : Suite à la tempête, perte de la ligne auxiliaire. Pas de conséquences sûreté.	
EDF	28-févr-90	Cattenom	39 m/s	Dégradation de structure ou d'équipement	Cattenom 3 : Arrachage de plusieurs panneaux de couverture du dispositif de goutte de l'aéroréfrigérant. Pas d'impact sur les filtres et pompes CRF. Pas d'impact sur la sûreté.	
EDF	07-févr-96	Flamanville		Dégradation de structure ou d'équipement	Sous l'effet du vent soufflant en tempête, à 140 km/h, un brin détaché du conducteur de la phase 0 en sortie du poste THT a, par contact avec la phase 4 voisine, a engendré un défaut de court-circuit entre phases. La sollicitation de la protection par survitesse est due à un fouettement du bout d'arbre en raison de la torsion/flexion causée par le court-circuit	ESS
EDF	07-févr-96	Blayais	33m/s le 07/02/1996	Perte de l'alimentation électrique externe	Blayais : Perte de la ligne 400 kv suite à un défaut électrique au poste de transformation de Braud et Saint Louis. Pas de conséquences sûreté.	
EDF	07-févr-96	Golfech	<30 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Golfech 1 : Perte d'une ligne 400 kv. Pas de conséquences sûreté.	
ANDRA	06-août-97	CSA	Direction DDmax en rose de 360°: 28, Vraifale 25 km/h	Perte de l'alimentation électrique externe	perte de l'alimentation électrique à partir du réseau EDF pendant une quinzaine d'heures. Aucune conséquence sur la sûreté n'a été mentionnée	DSIN informée par courrier ANDRA/DG/97-467 du 06/08/97
EDF	21-août-98	Paluel	vent max à Dieppe (MF) : 23 m/s	Arrivée Massive de colmatant	AAR du réacteur dû à une arrivée massive d'algues après de forts coups de vent (orage), qui a provoqué successivement la perte des pompes CRF.	
EDF	24-août-98	Penly	vent max à Dieppe (MF) : 24 m/s	Arrivée Massive de colmatant	AAR dû au déclenchement manuel des pompes de circulation CRF par DN dégrilleurs en application de la consigne ICFI. Origine: arrivée massive et brutale d'algues après de forts coups de vent	
EDF	03-nov-98	Paluel	vent max à Dieppe (MF) : 24 m/s	Arrivée Massive de colmatant	AAR par déclenchement des pompes de circulation CRF (DP sur TF) dû à une arrivée massive d'algues à marée basse faisant suite à une tempête.	

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	déc-99	Blayais	Ces tempêtes sont caractérisées par : - Un vent d'intensité de 170 à 190 km/h autour des valeurs prises en compte pour la conception, - Une dépression de -30 à + 40 mbar, - Une intensité des pluies inférieure à des valeurs décennales.	Perte de l'alimentation électrique externe (inondation) Dégradation de structure ou d'équipement (y compris par impact de projectiles)	Des détériorations ont été relevées sur les structures et bâtiments non EIPS (vitres brisés, ...). Les perturbations les plus importantes ont été observées sur les deux centrales NOGENT le 26/12/99 et Blayais le 27/12/99. Les risques concernent les bâtiments et structures annexes ainsi que le risque pour les personnes des centrales impactées. De façon générale, il n'a pas été observé d'endommagement sur les systèmes, structures et ouvrages de génie civil remplissant ou contenant une fonction de sûreté. Concernant la perturbation du réseau interconnecté, les centrales nucléaires soumises aux tempêtes de 1999 se sont bien comportées fonctionnellement. Les effets indirects des tempêtes sont liés aux perturbations du réseau et à la génération de projectiles. Les dépressions observées n'ont entraîné aucun désordre sur les installations nucléaires que ce soit sur les systèmes de ventilation ou sur les différents dispositifs de fermeture (portes, clapets, trémies, ...). Aucune problématique liée à la présence de pluies (intensité moyenne lors des tempêtes). Le site du Blayais a conservé sa ligne d'évacuation principale 400 kv mais a fait face à une perte des alimentations électriques du fait des conséquences de l'inondation partielle du site. Les plateformes d'évacuation d'énergie se sont bien comportées dans ce contexte exceptionnel. Les projectiles observés sur certains sites nucléaires lors des tempêtes de 1999 sont de nature diverses : branchages, débris de vitres, bardages métalliques, graviers..	
ANDRA	26-déc-99	CSA	Direction DDmax en rose de 360°: 28, Vraffale 122 km/h	Perte de l'alimentation électrique Dégradation de structure ou d'équipement (y compris par impact de projectiles) Impact sur la fonction de surveillance de l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> • perte de l'alimentation électrique EDF • des bardages, panneaux ont été déboîtés, mais ne sont pas à considérer comme des projectiles • des tôles ont été arrachées et retrouvées au sol (projectiles) Projectiles observés : quelques tôles métalliques. Suite à la tempête, l'exploitation des stations de surveillance de l'environnement se trouvant en zone forestière a été suspendue pour des raisons de sécurité des opérateurs conformément aux décrets préfectoraux.	DSIN informée par télécopies ANDRA/DCS/CA/99/516 et 517 des 27 et 28/12/1999.
ANDRA	06-juil-01	CSA	Nuit du 05 au 06/07/2001 Direction DDmax en rose de 360°: 20, Vraffale 54 km/h	Dégradation de structure ou d'équipement	<ul style="list-style-type: none"> • bâche protégeant l'ouvrage E29R05 en partie arrachée • bâche installée sur l'ouvrage E25R05 partiellement endommagée Ouvrage E29R05 découvert sur 1x20 m entraînant une infiltration d'eau de pluie à l'intérieur de l'ouvrage (40 litres environ), mais récupérée au niveau du RSGE	ES niveau 0
EDF	17-déc-04	Flamanville	43 m/s	Perturbation des systèmes de ventilation ou du confinement dynamique	Flamanville 2 : Déclenchement DEL sur débit incorrect d'air. Pas de conséquence sur la sûreté.	

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	17-déc-04	Paluel	43 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Paluel 3 : indisponibilité du transformateur auxiliaire par protection masse câble 400 kV. Perte du TA. Pas de conséquence sur la sûreté.	
EDF	08-déc-06	Cattenom	<30 m/s	Perturbation des systèmes de ventilation ou du confinement dynamique ?	Déclenchement du compresseur DEL par débit d'air bas. Pas de conséquences sûreté.	
EDF	18-janv-07	Cattenom	<30 m/s	Perturbation des systèmes de ventilation ou du confinement dynamique ?	Déclenchement du compresseur DEL par débit d'air bas. Pas de conséquences sûreté.	
EDF	15-janv-08	Chooz A	La vitesse de vent relevé le 15/01 fait apparaître des pointes à 80 km/h.	Dégradation de structure ou d'équipement	Sur le chantier d'évacuation des viroles de Chinon A3, les vents violents ont provoqué l'effondrement du toit du barnum utilisé comme extension de la zone contrôlée. L'avis de tempête émis la veille avait amené la Direction de la SD de Chinon A à suspendre le chantier. Un colis viroles du type « rhénamacas » contrôlé « DI 82 » et un conteneur vide exempt de contamination se trouvaient sous le barnum au moment de l'événement. Le barnum était dimensionné pour des vitesses de vents en conditions normales de 112 km/h et de 150 km/h en rafales. La vitesse de vent relevé le 15/01 fait apparaître des pointes à 80 km/h. L'ouvrage était inadapté. L'analyse des causes est en cours (note de calcul ou bien construction de l'ouvrage).	Chantier de Chooz A
EDF	24-janv-09	Blayais	44,5 m/s	Perturbation des systèmes de ventilation ou du confinement dynamique ?	Déclenchement ventilation. Pas de conséquences sur la sûreté.	
EDF	24-janv-09	Golfech	34 m/s	Perte de l'alimentation électrique externe	Golfech 2 : perturbation sur le réseau 400 kV. Pas de conséquences sur la sûreté.	
EDF	10-févr-09	Civaux	34 m/s	autre (mouvement d'eau)	Civaux 1 : mouvement d'eau dans le bassin des aéroréfrigérant. Déclenchement automatique des pompes CRF. AAR par secondaire indisponible. Pas de conséquence sur la sûreté. Pas de perte de la source froide.	
EDF	28-févr-10	Dampierre	34 m/s	?	Dampierre 3 : Déclenchement de la résistance DVE par débit fort vent extérieur. Pas de conséquences sur la sûreté.	
EDF	28-févr-10	Chinon	33,8 m/s	?	Chinon B3 : Déclenchement de la cellule du régulateur DVC. Pas de conséquences sur la sûreté.	
ORANO	16-mars-11	Tricastin		Dégradation de structure ou d'équipement	une plaque translucide sur le toit du bâtiment 852 menaçait de s'arracher. Une expertise de l'ensemble des plaques en toiture a été réalisée et des actions de sécurisation de fixations qui le nécessitaient ont été lancées	- déclaration par fax DG/2011.390 du 18/03/2011 - CR de la SOCATRI transmis à l'ASN et à l'IRSN (référence 01PU6F04353)

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
ORANO	mars-13	La Hague		Dégradation de structure ou d'équipement	Détérioration partielle du bardage métallique d'une façade du bâtiment 115.	- Déclaration à l'ASN Caen (référence 2019-18568) du 03/04/2019 CR transmis à l'ASN Caen (référence 2019-32943) par lettre en référence 2019-41688 du 08/07/2019
ORANO	23-déc-13	La Hague		Dégradation de structure ou d'équipement	Observation à partir du 23 décembre 2013 d'un mouvement d'oscillations de la cheminée de la centrale de Production de Chaleur au Fioul domestique (CPCF) sous l'effet de vents forts, ayant nécessité la dépose de son tronçon supérieur ainsi que de l'amortisseur	-Déclaration à l'ASN Caen (référence 2014-2000) du 10/01/2014 - CR révisé transmis à l'ASN Caen (référence 2014-7512 v2.0) par lettre 2014-65708 du 22/10/2014
ORANO	08-févr-15	Tricastin	rafales de vent > 100 km/h	Dégradation de structure ou d'équipement	rupture gaine de rejets ventilation suite à des rafales de vents > 100 km/h. Une gaine souple provisoire a été mise en œuvre en attente de la réparation définitive.	- déclaration par fax SOC-D-2015-00052 (en remplacement de SOC-D-2015-00046) à l'ASN (Lyon) et à l'IRSN du 20/02/2015 pour l'événement de février - CR révisé commun avec l'événement du 8 février (référence TRICASTIN-15-001737 v2.0), transmis à l'ASN (Lyon) et à l'IRSN par courrier SOC-D-2015-183.
ORANO	05-mars-15	Tricastin	rafales de vent > 100 km/h	Dégradation de structure ou d'équipement	démontage de la gaine souple de rejet de la ventilation du laboratoire, mise en place provisoirement en février 2015, par des rafales de vent > 100 km/h. Actions : Réparation définitive de la gaine et rédaction d'une procédure « Grand vent ». Cette dernière intègre le retour d'expérience de deux événements et définit les actions de mise en sécurité à réaliser lors d'une alerte de vent violent. Elle présente également les actions de vérification de l'intégrité des toitures et cheminées suite à un épisode de vent violent	- déclaration par fax SOC-D-2015-00068 - CR révisé commun avec l'événement du 8 février (référence TRICASTIN-15-001737 v2.0), transmis à l'ASN (Lyon) et à l'IRSN par courrier SOC-D-2015-183.
ANDRA	13-janv-17	CSA	Nuit du 12 au 13/01/2017 Direction DDmax en rose de 360°: 26, Vraifale 67 km/h	Perte de l'alimentation électrique Impact sur la fonction de surveillance de l'environnement	coupure de l'alimentation électrique EDF ayant entraîné une interruption des prélèvements d'aérosol et iode à la station atmosphérique AS2. Interruption des prélèvements atmosphériques pendant 9h26 min	EIE n°4.1 « Défaut au programme et aux modalités réglementaires de surveillance des effluents et de l'environnement suite à l'indisponibilité de matériel de surveillance, sans impact significatif sur l'environnement »
Framatome	15-juin-19	Romans-sur-lsère	orage (vent fort + grêle + tonnerre)	?	branches d'arbres arrachées sur le parking extérieur Infiltration d'eau localisée, dans les ateliers AP1, F2L et L1 Parc S5 : renversement de fût de 200L vides + 5 conteneurs maritime ouvert par le vent microcoupure électrique ayant entraîné la perte de la ventilation sur les ateliers F2L et R1, ainsi que la mise en défaut de 2 sondes EDAC	MAVEA - FD CNV 587/ PST 585-586-589 / Site 591

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
ANDRA	09-févr-20	CSA	En 2020, problème de transmission des données entre le CSA et Météo-France.	<p>Perte de l'alimentation électrique</p> <p>Perturbation des systèmes de ventilation ou du confinement dynamique ?</p> <p>Impact sur la fonction de surveillance de l'environnement</p>	<p>coupures de l'alimentation électrique normale du centre de 19h45 à 22h54 heure à laquelle le réseau EDF est rétabli</p> <p>pendant cette coupure, le groupe électrogène démarre normalement mais la défaillance d'un coffret électrique dit « 48 volts » empêche l'alimentation d'une partie du réseau secours (laboratoire et bâtiment des services, ventilation nucléaire, réseau ondulé non secourus)</p> <p>les prélèvements réalisés pour la surveillance des rejets atmosphériques ont été interrompus de 21H05 à 21H45 (hors période d'exploitation) - Perte du confinement dynamique de la presse à compacter, mais confinement statique assuré par les parois, portes, trappes et joints gonflables</p> <p>Le lendemain, perte de l'alimentation électrique normale pendant 6h avec reprise automatique de l'alimentation du centre par le GE fixe.</p>	<p>EIE n°4.1 « Défaut au programme et aux modalités réglementaires de surveillance des effluents et de l'environnement suite à l'indisponibilité de matériel de surveillance, sans impact significatif sur l'environnement »</p> <p>EIS n°3.1 « Evénements ayant conduit au franchissement d'une ou plusieurs limites de sécurité relatives à un EIP sans sortir du domaine d'exploitation »</p>
ORANO	29-déc-98	La Hague		Dégradation de structure ou d'équipement	UP3 A / Cheminée : détérioration de plusieurs boulons d'assemblage d'une bride de fût externe de la cheminée	
ORANO	20-mars-18	Pierrelatte		Dégradation de structure ou d'équipement	Comurhex 2 - pan du bardage métallique arraché par le vent	
ANDRA	08-déc-06	Soulaines		Dégradation de structure ou d'équipement	CSA / : Débâchage partiel d'un ouvrage de stockage fermé	
CEA	03-févr-90	Fontenay-aux-Roses	Tempête Herta	Dégradation de structure ou d'équipement	INB 59 - RM2 - Arrachement de deux lanterneaux translucides en toiture du hall et du couloir matériel.	INES 0
CEA	26-déc-99	Fontenay-aux-Roses	Tempête Lothar	<p>Perte de l'alimentation électrique</p> <p>Dégradation de structure ou d'équipement (y compris par impact de projectiles)</p> <p>Impact sur la fonction de surveillance de l'environnement</p>	<p>Centre et INB 57 - Défaillance réseau EDF de 7h30 à 9h55</p> <p>Perte du report des alarmes du PCS</p> <p>Perte de l'alimentation électrique de 5 des 6 stations de surveillance de l'environnement, la sixième, seule alimentée en courant secours, étant restée opérationnelle.</p> <p>Perte d'une mesure bêta sur la cheminée de la tranche 2 de l'INB 57</p> <p>Renversement du coffret dépotage des cuves trans-Pu de l'INB 57, inutilisé depuis 1972, sans dégradation du confinement</p>	INES 0

Exploitant	Date	Site/INB	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
CEA	27-mai-08	Cadarache		Dégradation de structure ou d'équipement	INB 37 - STED - Arrachement d'une partie du lanterneau en matière plastique translucide en travée centrale du bâtiment 313; Le lanterneau composé de panneaux de 3m x 5m sur 50 m de longueur a été partiellement arraché sur une longueur de 20m environ, côté est du bâtiment. Des panneaux arrachés ont été projetés au sol à l'ouest du bâtiment, sans conséquence en termes de sécurité; d'autres panneaux arrachés sont restés sur la toiture.	INES 0
CEA	10-févr-09	Valduc	Tempête Quinten	Perte de l'alimentation électrique externe	ICT-ICPE Centrale d'énergie Bâtiment 149 Chute de tension du réseau d'alimentation RTE 63 kV provoquant l'ouverture du disjoncteur général. Le centre a été privé d'alimentation électrique durant 2 minutes 27 secondes.	INES 0

Tableau 20. Retour d'expérience sur les sites nucléaires en lien avec un phénomène initiateur de type neige

Exploitant	Date	Site/INB	Phénomène	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	13-déc-1990	Creys-Malville	Neige	Poids estimé à 190 kg/m ²	Dégradation de structure ou d'équipement	Effondrement de la moitié du toit de la salle des machines de la centrale Superphenix, nécessitant de remplacer un des deux groupes turboalternateurs. https://www.lemonde.fr/archives/article/1990/12/15/des-toitures-s-effondrent-a-la-centrale-de-creys-malville-et-a-eurexpo-lyon_3983620_1819218.html Rapport d'enquête sur Superphénix et la filière des réacteurs à neutrons rapides (assemblee-nationale.fr)	
EDF	1999	Belleville	Pluie Verglaçante		Isolement du site	accès du site perturbés par apparition de verglas	
EDF	2002	Penly	Pluie Verglaçante		Isolement du site	isolement du site à cause de la pluie verglaçante	
EDF	30-déc-05	Paluel	Pluie Verglaçante	De 8h à 13h30 : La température a varié de -1,4°C à +1°C. Humidité : 95 %. Vitesse du vent moyen : 17 m/s. Pluviométrie : 0,2 mm Pression atmosphérique : en décroissance linéaire de 994 à 985 hPa	Perte d'alimentation électrique externe	Les mauvaises conditions météorologiques (pluies verglaçantes et température très froide) ont provoqué la mise hors tension de la ligne principale des tranches 1, 2, 3 et 4. L'ilotage est réussi sur les tranches 1, 3 et 4. Un AAR a lieu sur la tranche 2 suite à un déclenchement turbine. La pluie verglaçante a entraîné un contournement de l'isolateur (prise en glace des isolateurs) La tranche 2 a fonctionné sur diesels. Aucune conséquence réelle sur la sûreté sur les tranches 1, 3 et 4. Un AAR a eu lieu sur la tranche 2 et déclenchement d'un INFRA-PUI	niveau INES 0
ANDRA	janv-10	CSM	Neige		Isolement du site	Personnel ANDRA et prestataire bloqués une nuit sur le centre Participation (en plus des pluviométries moyennes) à l'évolution de la restitution du volume CMG	Aucun impact sur la sûreté

Exploitant	Date	Site/INB	Phénomène	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/ avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	10-janv-10	Bugey	Neige	Episode neigeux du 08 et 10/01/10 Les éléments disponibles sont les hauteurs de neige estimées de 15 à 20 cm maximum sur le site.	Dégradation de structure ou d'équipement	Affaissement de deux des onze chapiteaux destinés à abriter les déchets pathogènes issus de la rénovation des aéroréfrigérants des unités de production n°4 et 5	niveau INES 0
ANDRA	déc-10	CSM	Neige		Isolement du site	Agents ANDRA et prestataire bloqués à leur domicile Participation (en plus des pluviométries moyennes) à l'évolution de la restitution du volume CMG	Aucun impact sur la sûreté
EDF	04-déc-10	Flamanville	Neige	Les seuls éléments disponibles sont le maximum de hauteur de neige de l'hiver observé à la station de Gonneville, de l'ordre de 50 cm	Dégradation de structure ou d'équipement	Sous le poids de la neige, une partie de la toiture du BAC s'est affaissée sur une surface d'environ 20 m ² , au niveau d'un entreposage de futs plastiques conditionnés de déchets très faiblement radioactifs, sans affecter l'intégrité de ces futs. La cause du sinistre est liée à un problème de conception de la charpente métallique du BAC sur le portique file 12 cumulée à une charge de neige supérieure à la charge de dimensionnement. L'assemblage de l'encastrement de faitage a vu certains de ses boulons rompre ce qui a entraîné la ruine d'une panne et le déchirement du bardage en toiture. L'aléa rencontré sur le BAC de Flamanville ne concerne que cet ouvrage et ne remet donc pas en cause le dimensionnement des autres ouvrages en charpente métallique.	ESS déclaré
ORANO	11-mars-13	La Hague	Neige		Isolement du site	Une indisponibilité des mesures en continu et des prélèvements et l'absence de prélèvement d'eau de mer ont justifié une analyse spécifique (pas d'impact sur les bâtiments, qui étaient essentiellement en arrêt pour maintenance). Les actions correctives ont consisté à mettre en place des seuils d'alerte (neige/vent/température) pour créer une cellule de décision et à réviser la gestion des moyens de transport (accès au site) et du personnel bloqué sur site.	-Déclaration à l'ASN Caen (HAG 0 0000 13 20020) du 18/03/2013 - CR transmis à l'ASN Caen (HAG 0 0610 13 20204) par lettre du 17/05/2013

Exploitant	Date	Site/INB	Phénomène	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/ avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	Entre le 11/03 et 13/03/2013	Paluel	Neige	<p>Eléments du bulletin prévisionnel du lundi 11 mars 15 h : aux hauteurs déjà présentes (2 à 5 cm en général et localement 5 à 10 cm) vont venir s'ajouter des cumuls de 15 à 20 cm, localement 25 à 30 cm. Compte tenu d'un renforcement du vent avec des rafales de 60 à 80 km/h, des congères peuvent se former, accentuant la hauteur de neige observée.</p> <p>Pour information, le maximum de hauteur de neige de l'hiver observé à la station de Gonneville est de l'ordre de 50 cm.</p>	Isolement du site	<p>Pas de conséquence sur les installations. Seule conséquence notable : L'épisode neigeux a rendu difficile l'accès au CNPE par les voies routières qui le desservent. Dans ces conditions, le site n'était potentiellement pas en mesure de gérer la totalité de l'équipe de crise dans le délai prescrit.</p> <p>Conséquences réelles sur la sûreté : Aucune conséquence réelle sur la sûreté. Aucune tranche du site n'a rencontré une situation relevant de déclenchement d'un PUI.</p> <p>Conséquences potentielles sur la sûreté : En cas de déclenchement du PUI, du fait des conditions d'accès, des difficultés auraient pu être rencontrées pour gérer l'ensemble des PC opérationnels conformément à la prescription N° 27 du référentiel de crise (chaque PC opérationnel doit être gréé en 1 heure maximum). Néanmoins, en cas de déclenchement du PUI, la sûreté aurait été assurée par la mise en œuvre immédiate des procédures APE par les équipes de conduite qui étaient gréées conformément au référentiel. Par ailleurs, une équipe d'appui a été gréée en permanence au centre de crise national à partir du mardi 12 mars en fin de matinée afin d'apporter en cas de besoin un appui au site. Enfin, en cas de nécessité, il aurait été fait appel à la préfecture pour dégager les accès au site. Les conséquences potentielles sur la sûreté sont donc négligeables</p>	Déclaration RES D5310RES000613, niveau INES 0

Exploitant	Date	Site/INB	Phénomène	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/ avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
EDF	Entre le 11/03 et 13/03/2013	Penly	Neige		Isolement du site	<p>L'épisode neigeux qui a impacté la Normandie entre le 11 et le 13 mars 2013, a rendu difficile l'accès au CNEPE par les voies routières qui le desservent. La persistance des chutes de neige accompagnée de vents violents ainsi que l'abandon de véhicules sur les voies de circulation ont rendus les opérations de déblaiements engagés par les pouvoirs publics difficiles. Dans ces conditions, le site n'était pas potentiellement en mesure de gérer la totalité de l'équipe de crise dans le délai d'une heure prescrit par le référentiel de crise de la DPN.</p> <p>Du lundi 11/03/2013 à partir de 19h00 au mardi 12/03/2013 vers 14h00, de fortes chutes de neige combiné à des vents violents formant des congères ont rendues les routes D925 (Axe Eu-Dieppe) et D113 (Axe Belleville sur mer-CNPE) difficilement praticables. Ces routes sont les deux axes principaux utilisées par le personnel pour rejoindre le CNPE. Par ailleurs, beaucoup de routes secondaires sont restées totalement impraticables, empêchant souvent le personnel de sortir de chez lui.</p> <p>Seul un nombre réduit de personnels équipé de véhicules avec des capacités de franchissement ou habitant à proximité a été capable de rejoindre le CNPE.</p> <p>Le tronçon de route situé entre la D925 et la route d'accès au CNPE a été déneigé par les moyens du site et est resté utilisable ; il en a été de même pour les voies de circulation à l'intérieur du site, dont la route reliant le haut au bas de la falaise. L'axe Penly-Dieppe a été déneigé à deux reprises par les moyens du site, notamment pour permettre l'arrivée de l'équipe de décision locale le 13 mars au matin.</p>	ESS déclaré
EDF	Entre le 11/03 et 13/03/2014	Flamanville	Neige			<p>A la suite de l'alerte Météo-France de vigilance orange « risque neige et verglas », la direction du CNPE prend les décisions de renvoyer le personnel à leur domicile le lundi 11/03/2013 à partir de 14 heures et les astreintes le même jour à partir de 16 heures. Le lendemain, la dégradation de la situation météo (passage en alerte rouge) est telle, qu'il n'est pas possible de garantir que toutes les astreintes auraient pu rejoindre leur poste dans le délai de 1h comme le demande la prescription n027 du référentiel de crise.</p>	ESS déclaré
ANDRA	14-mars-13	CSM	Neige	Neige accompagnée de vent	Isolement du site	<p>Personnel renvoyé avant intempéries</p> <p>Astreinte ANDRA et personnel du poste de garde bloqués sur le centre pendant 4 jours</p> <p>Congères empêchant la circulation du personnel, que ce soit pour quitter ou venir sur le Centre ou pour circuler sur les voiries périphériques du CSM</p> <p>Participation (en plus des pluviométries moyennes) à l'évolution de la restitution du volume CMG</p> <p>Surveillance des ruisseaux interrompue toute la journée</p> <p>Aucun impact sur la sûreté</p>	

Exploitant	Date	Site/INB	Phénomène	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/ avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
Framatome	14-nov-19	Romans-sur-Isère	Neige		Perte de l'alimentation électrique externe Dégradation de structure ou d'équipement	Chutes de neige importantes ayant engendrées la chute d'arbres et l'endommagement de câbles électriques coupure électrique sur l'ensemble du site (environs 3 minutes) Déformations importantes (mais sans ruine) des toitures des bâtiments administratif et L1 sous le poids de la neige (bâtiment en charpente métallique « tertiaire »). Les toitures sont revenues à l'état initial au moment de la fonte de la neige).	MAVEA
ORANO	févr-90	La Hague	Neige	épisode du 13 au 17 février	Perte d'alimentation électrique externe	« Ainsi, en février 1970, une tempête de neige a privé de nombreuses localités, dont Cherbourg, d'électricité du fait notamment de la rupture de câbles électriques sous le poids du givre. Le site AREVA NC-La Hague, dont les installations étaient en période de maintenance, a également été privé d'alimentation électrique externe du 13 au 17 février. Les moyens électrogènes autonomes du Site ont permis de pallier cette panne, sans difficulté particulière. »	
ORANO	04-janv-79	La Hague	Neige		Isolement du site	« Après quelques épisodes de chute de neige à partir du 31 décembre 1978, une tempête de neige bloque l'accès au Site le 04 janvier dans l'après-midi pendant près de 24 heures, des congères amenant sur les voiries des hauteurs de neige dépassant quelquefois 2 mètres. Des équipes d'exploitation en poste d'après-midi, complétées par une partie de l'effectif du poste de nuit, ont ainsi assuré trois postes d'affilée en surveillance des installations après mise à l'arrêt de la production. La mise en œuvre des moyens de déblaiement par la Direction Départementale de l'Équipement, favorisée par la fin de la tempête, a permis un retour à la situation normale d'organisation des équipes de conduite dans la journée du 06 janvier. »	
CEA	31-déc-96	Marcoule	Neige		Isolement du site	INB 71 - Phénix Difficultés d'accès au site le 01/01/1997 - La relève d'un agent de ronde n'a pas été assurée le matin et l'après-midi du 01/01/1997 - Effectif réduit à 6 agents au lieu de 7 en dérogation aux RGE.	INES 0
CEA	02-déc-97	Saclay	Neige		Dégradation de structure ou d'équipement	INB 48 - Saturne Effondrement des sheds n°5 et 6 de la toiture du hall central du bâtiment 126 puis des sheds n°4 et 7 les jours suivants. Autres causes identifiées : Défaut de conception des poutres supportant les verrières, Défaut de réalisation des raidisseurs de ces mêmes poutres, Surcharge de la toiture due à des travaux	INES 0

Exploitant	Date	Site/INB	Phénomène	Information sur le phénomène	Type d'effet	info complémentaire sur les effets (projectiles générés, cible sûreté, conséquences potentielles/ avérées, documentation disponible..)	Evénement déclarés / significatif ? (+niveau)
CEA	27-févr-01	Cadarache	Neige		Perte de l'alimentation électrique Dégradation de structure ou d'équipement Autre (infiltration d'eau)	Détérioration du réseau de distribution électrique externe et interne du site : - Mise hors service d'une des 2 lignes EDF RTE 63 kV alimentant le Centre du 27/02/2001 au 10/03/2001 - Perte de l'alimentation électrique du centre pendant 3 secondes le 28/02/2001 - Perturbations électriques les 27 et 28/02/2001 entraînant divers dysfonctionnements sur plusieurs installations, en particulier des pertes de ventilation. - Chute des poteaux et/ou conducteurs de 3 lignes aériennes internes en service du réseau 15 kV; - Perte de l'alimentation électrique de l'INB 53 MCMF pendant 4 minutes le 28/02/2001. - Infiltrations d'eau de faible amplitude dans l'INB 25-RAPSODIE, l'INB 55-LECA et l'INB 53-MCMF. Autres causes identifiées : INB 39 MASURCA: - Faible sélectivité de disjoncteurs - Alimentation d'un compresseur mobile à partir d'un coffret électrique non secouru lors d'une opération de contrôle d'équipement programmée le 28/02/2021 INB 123 LEFCA: - Sensibilité d'équipements électriques aux perturbations électriques (Mode commun des alimentations ou absence de redondance)	INES 1

Annexe 3. Contribution complémentaire de Météo-France

Cette annexe présente les éléments complémentaires aux parties Phénomènes et Données relatives aux parties « Vent » (§ 2.1 du corps de texte) et « Neige » (§ 2.2 du corps de texte). Ces éléments concernent les mesures d'observation de surface (partie 3.1 ci-dessous), les capteurs utilisés pour la mesure du vent et de la neige (partie 3.2), la base de données climatologique de Météo-France (BDClim) (partie 3.3) et son dispositif d'alerte : la Vigilance météorologique (partie 3.4).

3.1. L'observation de surface (in situ)

Bien qu'elle soit devenue aujourd'hui très minoritaire en termes de volume de données par rapport aux gros producteurs que sont en particulier les systèmes de télédétection (depuis le sol ou depuis l'espace), l'observation de surface (in situ) n'en continue pas moins d'occuper une place centrale dans le dispositif de surveillance de l'environnement terrestre, en particulier l'atmosphère, et ce pour (au moins) deux raisons :

- 1) la profondeur historique de cette source de données, qui excède largement celle de toutes les autres sources et la rend incontournable en particulier dans le domaine de la climatologie ;
- 2) la nature purement locale des mesures in situ, qui les distingue des mesures de télédétection souvent intégrées sur un volume. Les mesures télédétections sont en ce sens davantage comparables à des sorties de modèles (intégrale sur une maille).

Ce document ne vise pas à décrire en détail l'ensemble des réseaux d'observation sol⁸⁰ qui constituent LE réseau d'observation de surface métropolitain. Il est limité à la description des plus importants, que ce soit en matière de missions ou en termes de nombre de postes.

3.1.1. Réseaux propriétaires de Météo-France

3.1.1.1. Réseau RADOME

Il s'agit du réseau « principal » de Météo-France, celui sur lequel s'appuie en priorité l'établissement pour répondre aux besoins de la veille météorologique (RADOME = Réseau d'Acquisition de Données et d'Observations Météorologiques Étendues). Il comprend deux niveaux :

- le niveau « synoptique » (SYNOP) dédié à la veille globale et régionale jusqu'à l'échelle du département,
- le niveau « régional » (RRA = Réseau Régional Automatique) pour la veille d'échelle sub-départementale.

⁸⁰ <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-stations-au-sol>

réseau RADOME en Métropole
595 stations opérationnelles dans la BOCLIM au 03/03/2021

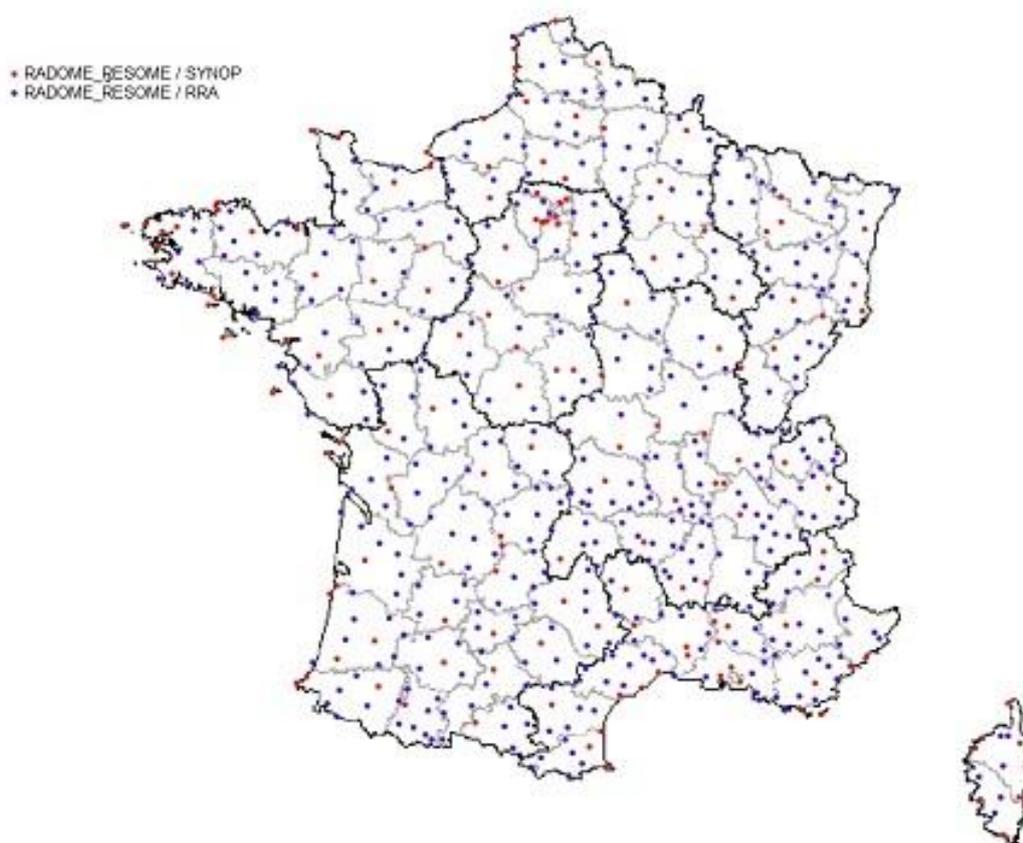


Figure 49 : Carte des stations opérationnelles du réseau RADOME en métropole

3.1.1.2. Réseau Climatologique d'État (RCE)

Le réseau Climatologique est composé de l'ensemble des stations maîtrisées par Météo-France, automatiques (temps réel ou différé) et manuelles qui participent à la surveillance du climat.

- **RCE_MANUEL** : réseau composé de sites tenus par des observateurs bénévoles, répondant à la mission « Veille climatologique » (mission principale) ;
- **RCE_AUTO** : réseau composé des sites automatisés du Réseau Climatologique d'État ;

Une évolution importante du RCE_MANUEL est en cours à Météo-France. Les sites tenus par des observateurs bénévoles effectuant des relevés manuels vont progressivement disparaître. Un tiers uniquement des postes de ce RCE_MANUEL sera complètement automatisé à l'horizon fin 2022 et constituera à terme le RCE_AUTO. La définition du RCE_AUTO prend en compte les besoins de caractérisation du changement climatique ainsi que l'observation dans les zones à forte variabilité climatique telles que la montagne.

3.1.2. Réseaux en partenariat

Ces réseaux sont opérés par Météo-France pour répondre à des besoins d'organismes partenaires (DGPR, assistance aux feux de forêt...). Il s'agit du réseau OARA (Observation Automatique au-delà de RADOME/RESOME) qui comprend :

- **OARA-DGPR_SALAMANDRE** : réseau composé de stations automatiques essentiellement pluviométriques (quelques capteurs de hauteur de neige) ; réseau temps réel répondant au besoin de la DGPR pour la prévision des crues et la veille hydrologique. Ce réseau est composé actuellement de toutes les stations SALAMANDRE ;
- **OARA-FEUX_FORET** : réseau composé des stations Feux de Forêt financées par le CFM (Conservatoire de la Forêt Méditerranéenne) et des Conseils Généraux. Ces stations transmettent des données de vent, température de l'air, précipitations, humidité relative pour l'analyse météorologique du danger d'incendie ;
- **OARA-SEMAPHORES** : réseau composé de sémaphores de veille équipés de capteurs pour la mesure automatique du vent. Sur certains sites, les guetteurs sémaphoriques réalisent des observations humaines (état de la mer, visibilité, etc.) et certains sémaphores mesurent pluie et température.

3.1.3. Réseaux d'Intérêt Commun (RIC)

Les échanges de données sont définis dans une convention établie entre Météo-France et le partenaire pour rendre complémentaires les réseaux de mesures des paramètres météorologiques des deux organismes en définissant ainsi un Réseau de sites de mesures météorologiques dits d'Intérêt Commun (RIC).

Météo-France et le partenaire sélectionnent, au sein de leurs réseaux propres, des sites de mesures dont les données leur appartiennent et qui sont mises à la disposition des deux organismes pour satisfaire leurs besoins spécifiques dans le cadre de leurs missions.

Les stations appartenant à ces réseaux ne sont pas maintenues ni maîtrisées par Météo-France et les données issues de ces stations ne sont pas expertisées par Météo-France. Trois réseaux sont actifs :

- **RIC INRA** : réseau composé de stations appartenant à l'INRA ou dont la gestion a été confiée à l'INRA, utilisées dans le cadre de leurs activités de recherche nécessitant des données agrométéorologiques précises. Les données de ces stations sont transmises sur le serveur de données de Météo-France.
- **RIC EDF** : réseau composé de stations financées et appartenant à EDF, utilisées dans le cadre de ses missions d'optimisation de la gestion de la ressource en eau et d'exploitation des ouvrages de production nécessitant des données pluviométriques, thermométriques et hauteur de neige.
- **RIC DGPR** : réseau composé de stations opérées par la DGPR (Direction Générale pour la Prévention des Risques), fournissant des données de précipitations exploitées par les services de prévision des crues.

3.1.4. Cas particulier du Réseau SEMENCE

L'appellation « Réseau SEMENCE » peut faire référence soit à la convention qui lie Météo-France et EDF pour les 20 CNPE, soit au serveur et à la base de données qu'il héberge, sur lequel sont actuellement concentrées les données issues des CNPE d'EDF mais aussi des données d'autres sites nucléaires : stations CEA (7 stations), ORANO (ex-AREVA) (2 stations).

Dans le périmètre de la convention Météo-France / EDF, le contrat-cadre SEMENCE EDF CNPE comporte un cahier des clauses techniques particulières (CCTP) pour la surveillance météorologique des CNPE en fonctionnement normal.

Ce CCTP définit les rôles respectifs de Météo-France et d'EDF dans la surveillance météorologique des CNPE en fonctionnement normal. L'organisation repose entre autres, sur une assistance à maîtrise d'ouvrage basée sur un partenariat renforcé avec Météo-France, référent national du domaine météorologique.

Un contrat Météo-France / EDF précise les conditions selon lesquelles Météo-France et EDF interviennent dans la définition, l'implantation, la mise en service, l'exploitation et la remise à niveau des matériels de mesures météorologiques installés sur les sites nucléaires EDF. Il indique également comment Météo-France héberge et met à la disposition d'EDF les données météorologiques acquises, ainsi que les résultats des études qu'il serait amené à effectuer pour EDF ou pour les Pouvoirs Publics à partir de ces données.

Ce contrat comporte deux lots :

- hébergement des données d'observations météorologiques des sites des CNPE sur le serveur SEMENCE,
- visites annuelles de conformité des installations météorologiques des sites des CNPE.

Modalités d'exécution à Météo-France:

Météo-France héberge les données météorologiques brutes de l'ensemble des sites EDF, via un système informatique dénommé SEMENCE (comme SERveur METéorologique pour les sites NuClEaires). Ces données brutes sont stockées par Météo-France et mises à disposition mensuellement dans une application dédiée, disponible sur le serveur ftp de Météo-France (ftp.meteo.fr).

Conditions d'exploitation du serveur SEMENCE

Le serveur SEMENCE est implanté dans les locaux du Centre de Météo-France. Il est exploité 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

Des outils de supervision permettent notamment aux exploitants de Météo-France :

- la consultation interactive des messages et données de la base,
- le suivi du fonctionnement et la relance éventuelle des procédures activées automatiquement.

Le protocole (en annexe 4 au CCTP) précise les caractéristiques techniques et les fonctionnalités du serveur SEMENCE :

- il surveille la bonne réception de l'ensemble des données de tous les sites,
- il informe EDF en temps réel lorsque des dysfonctionnements (ou anomalies) apparaissent (non-réception d'une ou de toutes les données d'un site),
- il fournit les statistiques mensuelles de disponibilité des données dans SEMENCE,
- il formate et met à disposition d'EDF les données des prévisionnistes de Météo-France,
- il archive les données brutes.

Une sauvegarde quotidienne de la base de données (les données récentes) est effectuée. Une sauvegarde mensuelle des fichiers archives constitués est réalisée sur la « Machine d'archivage » de Météo-France à Toulouse.

Surveillance de l'acquisition des données

En tant que site hébergeur, Météo-France est responsable du système de surveillance à distance de l'acquisition des données. EDF assure pour sa part l'acheminement des messages des CNPE vers Météo-France via des équipements et des liaisons internes ainsi qu'un serveur ftp.

La surveillance du fonctionnement des installations météorologiques consiste en un contrôle de présence des données toutes les 3 heures, entre 3 h et 21 h UTC.

Des statistiques de disponibilité des données sont effectuées mensuellement pour chaque site, capteur par capteur, y compris pour l'indicateur de turbulence.

Contrôles des données

Contrôles en temps quasi réel : ces contrôles sont destinés à mettre en évidence les anomalies de fonctionnement les plus flagrantes. En routine, ces contrôles sont effectués toutes les 3 heures par Météo-France.

- contrôle de présence :
 - au niveau message : s'assurer qu'un message a bien été reçu de chacun des sites,

- au niveau capteur : s'assurer que chaque capteur de chaque site fournit bien des mesures.
- contrôle de vraisemblance (contrôles ne concernant que les données sol) :
 - comparaison entre date/heure du serveur et date/heure des observations,
 - contrôle d'appartenance des données au domaine de définition du capteur correspondant.

Contrôle des données par monitoring

En complément des contrôles de présence des données, mentionnés ci-dessus, Météo-France procède en routine à des contrôles dits de « monitoring », consistant à comparer les statistiques mensuelles des mesures obtenues avec celles d'un modèle de prévision à 6 h. Toutes les valeurs a priori aberrantes sont signalées par Météo-France. Des contrôles sont aussi effectués en entrée des bases opérationnelles de Météo-France et peuvent donner lieu à des détections d'anomalie transmises à EDF.

Contrôles en temps différé et archivage :

Il est par ailleurs convenu que les données « sol » sont archivées dans la base nationale de données climatologiques de Météo-France (BDClim), après application des contrôles climatologiques réguliers réalisés selon les mêmes procédures que celles appliquées à ses propres données.

Les stations EDF sont de type 3 et bénéficient du niveau de service : « stations automatiques avec acquisition en temps réel et expertise en temps différé (maximum jusqu'à Mois +21 jours).

D'autres stations nucléaires peuvent être de type 5 : « stations avec acquisition en temps réel ou différé, non expertisées ou avec expertise des données non garanties ».

3.1.5. Métadonnées

En plus des métadonnées « standard » que sont la localisation géographique (longitude, latitude, altitude) et le repérage temporel (année/mois/jour et heure/minute/seconde), les mesures réalisées par les stations sont caractérisées par deux paramètres importants : le type de la station et sa classe environnementale.

3.1.5.1. Type de station

Le paramètre « Type de station » permet de classer les différentes stations en prenant en compte d'une part le délai de mise à disposition des données dans la BDClim et d'autre part le délai d'expertise de ces données.

Tableau 21. Différents types de station définies par Météo-France

0	Stations synoptiques RADOME-RESOME acquisition en temps réel, expertise à J+1
1	Stations RADOME-RESOME RRA acquisition en temps réel, expertise à J+1
2	Stations automatiques non RADOME-RESOME avec acquisition en temps réel et expertise à J+1
3	Stations automatiques avec acquisition en temps réel et expertise en temps différé (à M+21 jours maxi)
4	Postes climatologiques manuels ou stations avec acquisition en temps différé et expertise en temps différé (à M+21 jours maxi)
5	Stations avec acquisition en temps réel ou différé, non expertisées ou avec expertise des données non garantie

3.1.5.2. Classe environnementale

Le document de référence en vigueur à Météo-France est actuellement la Note technique 35 B [103]. Ce document traite les paramètres : température et humidité, précipitations, vent de surface, rayonnement global et diffus, rayonnement direct et durée d'insolation.

La version A (Août 2009) de la Note technique n°35 a servi de base à l'élaboration de la classification OMM de l'environnement des sites de mesure de surface, qui est désormais intégrée dans le chapitre 1 du Guide CIMO (Document OMM n°8). Il existe quelques différences de seuils dans les critères retenus dans la classification OMM par rapport à la version A de la Note technique n°35. Ces différences sont plus contraignantes pour la classification du vent, moins contraignantes pour la classification de la température et du rayonnement.

L'ensemble des stations du réseau propriétaire de Météo-France dispose d'une information sur la classe environnementale. La connaissance de cette information est également recommandée pour les Réseaux d'Intérêt Commun ou le réseau SEMENCE mais n'est pas systématiquement disponible pour l'ensemble des sites.

Paramètre Vent

Selon les règles usuelles, les capteurs de vent sont placés à 10 m au-dessus du sol et sur un terrain dégagé, c'est-à-dire une surface où les obstacles se situent à une distance d'au moins dix fois leur hauteur.

- Rugosité

La mesure du vent n'est pas perturbée uniquement par les obstacles environnants, la rugosité du terrain exerce aussi une influence. Pour l'OMM, le vent de surface mesuré aux stations terrestres est le vent qui soufflerait à une hauteur géométrique de 10 m sur un site ayant une longueur de rugosité égale à 0,03 m.

C'est en quelque sorte un vent de référence dont on connaît les conditions exactes de mesure. Il convient donc de décrire la rugosité réelle du terrain autour du site de mesure, la longueur de rugosité servant à convertir le vent mesuré en vent de référence.

Le tableau ci-dessous présente la classification de la rugosité figurant dans le Guide de la CIMO⁸¹.

Tableau 22. Classification de la rugosité selon la CIMO

Classification des terrains d'après Davenport (1960), adaptée par Wieringa (1980) en terme de longueur de rugosité z_0		
Classe	Description du terrain	z_0 en mètres
1	Mer ouverte, « fetch » d'au moins 5 km	0,0002
2	Terrains bourbeux plats, terrain enneigé ; ni végétation, ni obstacles	0,005
3	Terrain plat ouvert ; herbe, rares obstacles isolés	0,03
4	Cultures basses ; larges obstacles occasionnels : $x/H > 20$	0,10
5	Cultures élevées ; obstacles dispersés : $15 < x/H < 20$	0,25
6	Terres clôturées, buissons ; obstacles nombreux : $x/H \sim 10$	0,5
7	Couverture régulière par de larges obstacles (faubourgs, forêts)	(1,0)
8	Agglomérations comprenant des bâtiments de diverses hauteurs	??

Note : x représente la distance au vent de l'obstacle et H est la hauteur des principaux obstacles correspondants

- Classe environnementale

Dans le cas de mesures exécutées à des hauteurs inférieures (à 2 m par exemple comme c'est parfois le cas à des fins agro-climatologiques), la classe de rang 4 ou 5 est attribuée (voir ci-après) avec l'indicateur «S» (situation particulière).

En présence d'obstacles nombreux de hauteur supérieure à 2 m, il est recommandé d'élever la hauteur de mesure de façon que les capteurs se trouvent à 10 m au-dessus de la hauteur moyenne de ces obstacles.

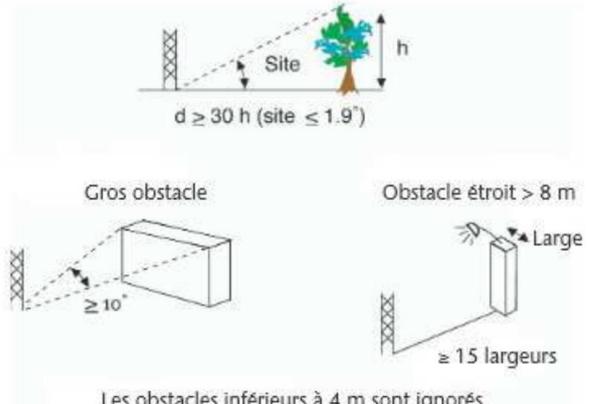
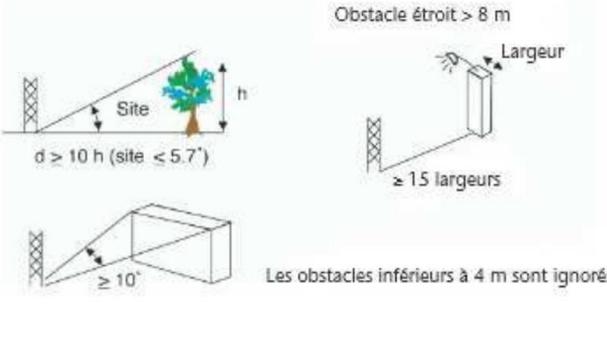
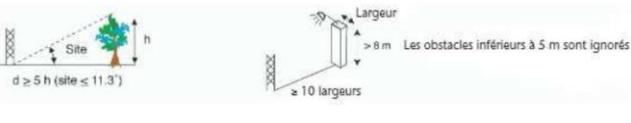
Cette méthode permet ainsi de minimiser l'influence des obstacles proches. Elle présente l'inconvénient de nécessiter un mât plus grand qui, n'étant pas standard, est donc plus cher. Elle est à envisager pour certains sites.

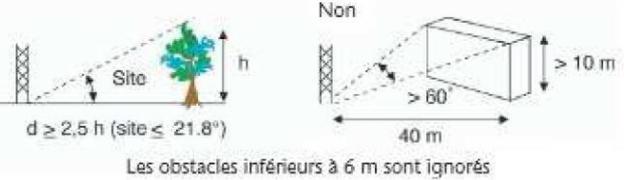
⁸¹ Commission des instruments et des méthodes d'observation

Dans ce cas, la hauteur des obstacles à considérer et la hauteur au-dessus du niveau situé 10 m en dessous des capteurs (par exemple, pour un anémomètre installé à une hauteur de 13 m, le point de référence pour mesurer la hauteur des obstacles se situe à 3 m au-dessus du sol. Si un obstacle mesure 7 m, une hauteur effective de 4 m est retenue.

Dans ce qui suit, un objet est considéré comme un obstacle s'il présente une largeur angulaire supérieure à 10°, sauf s'il s'agit d'un obstacle haut et étroit, comme cela est indiqué ci-dessous. Les variations d'altitude (positives ou négatives) proches n'étant pas représentatives de la région sont considérées comme des obstacles.

Tableau 23. Classes environnementales caractérisant les stations météorologiques

<p style="text-align: center;">Classe 1</p> <p>Le pylône est installé à une distance au moins égale à 30 fois la hauteur des obstacles environnants.</p> <p>Les capteurs se situent à une distance au moins égale à 15 fois la largeur des obstacles étroits (mât, arbre mince) dépassant une hauteur de 8 m.</p> <p>Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 4 m peuvent être négligés.</p> <p>L'indice de rugosité est compris entre 2 et 4 (longueur de rugosité $\leq 0,1$ m).</p>	
<p style="text-align: center;">Classe 2 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 30 %, correction possible)</p> <p>Le pylône est installé à une distance au moins égale à 10 fois la hauteur des obstacles environnants. Les capteurs se situent à une distance au moins égale à 15 fois la largeur des obstacles étroits (mât, arbre mince) dépassant une hauteur de 8 m.</p> <p>Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 4 m peuvent être négligés.</p> <p>L'indice de rugosité est compris entre 2 et 5 (longueur de rugosité $\leq 0,25$ m).</p>	
<p style="text-align: center;">Classe 3 (erreur supplémentaire due au site inférieure ou égale à 50 %, correction impossible)</p> <p>Le pylône est installé à une distance au moins égale à 5 fois la hauteur des obstacles environnants.</p> <p>Les capteurs se situent à une distance au moins égale à 10 fois la largeur des obstacles étroits (mât, arbre mince) dépassant une hauteur de 8 m.</p> <p>Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 5 m peuvent être négligés.</p>	

<p>Classe 4 (erreur supplémentaire due au site supérieure à 50 %)</p> <p>Le pylône est installé à une distance au moins égale à 2,5 fois la hauteur des obstacles environnants.</p> <p>Il ne doit pas y avoir d'obstacles, vus sur une largeur angulaire supérieure à 60°, et d'une hauteur supérieure à 10 m, dans un rayon de 40 m.</p> <p>Les obstacles isolés de hauteur inférieure à 6 m peuvent être négligés, à condition que les mesures soient exécutées à une hauteur minimale de 10 m.</p>	 <p>Les obstacles inférieurs à 6 m sont ignorés</p>
<p>Classe 5 (erreur supplémentaire due au site impossible à déterminer)</p> <p>Site ne respectant pas les critères de la classe 4.</p>	

A noter qu'en septembre 2022, Météo-France recense dans la BDclim 58 postes qui effectuent des mesures de vent au-delà de 10 m de hauteur. Sur ces 58 postes :

- Trois cas sont très particuliers: la Tour Eiffel est atypique avec son capteur à 321,5 m; Paris-Montsouris dont le capteur est situé à 25,5 m en haut d'une tour prévue pour résister aux tempêtes et pour mesurer le vent au-dessus de la cime des arbres qui l'entourent; le Mont-Aigoual à 11,5 m dont le capteur mesure le vent dans des conditions extrêmes.
- Trois postes proches des centrales EDF ou CEA effectuent des mesures au-delà de 10 m: Cadarache-CEA à 15 m, Nogent-EDF et Flamanville-EDF à 80 m (hauteur standard pour EDF).
- Toulon-Arsenal et Besançon-observatoire ont leur capteur vent à 20 m en raison de la présence d'arbres alentour. Aix-en-Provence mesure le vent à 15 m sur une toiture car il est situé en pleine ville et Camaret mesure également à 15 m en raison de nombreux bâtiments entourant le point de mesure.

D'autre part, 20 sémaphores effectuent des mesures de vent au-delà de 10 m en raison de leur situation très particulière d'exposition aux vents forts. Dans leur cas, il ne s'agit pas à proprement parler de « présence effective d'obstacles ».

Sur le total de 58 postes, les 28 autres postes effectuent des mesures de vent à des hauteurs comprises entre 10 m et 15 m.

Paramètre Neige

Le choix des sites de mesure de la neige est crucial car la neige est très sensible à la température et au vent. Ainsi, bien que Météo-France n'utilise pas de critère de classification de la qualité des sites de mesure de neige, il est néanmoins indispensable de prendre de grandes précautions dans le choix de ces sites.

Il est par exemple impératif d'effectuer cette mesure dans un **site relativement abrité du vent** pour éviter de mesurer les accumulations (ou les ablations) de neige dues au transport par le vent. De même, cette mesure doit se faire autant que possible en **site plat** et être **éloignée des sources de chaleurs** susceptibles de provoquer une fonte prématurée de la couche de neige.

3.2. Capteurs utilisés pour la mesure du vent et de la neige

3.2.1. Capteurs dédiés à la mesure du vent

Les différents capteurs de vent présents sur les stations Météo-France sont les suivants.

Tableau 24. Capteurs dédiés à la mesure du vent

<p>Capteur de vent ultrasonique THIES COMPACT</p>	
<p>Principe : La mesure du temps de propagation du son dans deux directions orthogonales permet de déterminer la vitesse et la direction du vent.</p>	<p>Caractéristiques techniques (données constructeur) : Vitesse : Gamme de mesure : 0-75m/s Incertitude : 0,2m/s puis 2 % puis 3 % > 60m/s Résolution : 0,1m/s Direction : Gamme de mesure : 0-359° Incertitude : 2° Résolution : 1° Gamme de fonctionnement : - en température : -50°C .. +70°C - en humidité : 0 ..100 %</p>
<p>Capteur de vent ultrasonique GILL WINDSONIC</p>	
<p>Principe : La mesure du temps de propagation du son dans deux directions orthogonales permet de déterminer la vitesse et la direction du vent.</p>	<p>Caractéristiques techniques :(données constructeur) Vitesse : Gamme de mesure : 0-60m/s Incertitude : +2 % à 12 m/s Résolution : 0,01 m/s Direction : Gamme de mesure : 0-359° Incertitude : +3° à 12 m/s Résolution : 0,1° Gamme de fonctionnement : - en température : -35°C .. +70°C - en humidité : 0 ..100 %</p>
<p>ENSEMBLE DE MESURE DE VENT INTERACTIF ALIZIA 312 STD</p>	

<p>Principe : La vitesse du moulinet est de 1 tour/s pour une vitesse de vent de 1 m/s. Un capteur magnétique reçoit un champ magnétique d'un aimant tournant avec le moulinet. La fréquence du signal ainsi obtenu est transmise vers l'unité centrale, qui mesure le nombre de tours et la vitesse de rotation. Le drapeau de la girouette transmet sa position à un potentiomètre. La résistance du potentiomètre est transmise à l'unité centrale qui en déduit la direction toutes les 500 ms.</p>	<p>Caractéristiques techniques : - Conditions assignées de fonctionnement : - températures : - 20°C à +55°C - humidité : 4 à 100 % hors condensation. - Métrologie : - anémomètre : seuil de démarrage : 0,5 m/s, résolution : 0,1 m/s, gamme : 0 à 80 m/s, constante de distance d'environ 4 m., incertitude 0,5 m/s ou 5 %.</p>
--	--

<p>ENSEMBLE DE MESURE DE VENT INTERACTIF DÉOLIA 96C</p>	
<p>Principe : La vitesse du moulinet est de 1 tour/s pour une vitesse de vent de 1m/s. L'axe du moulinet entraîne une cloche à 40 fentes qui passe entre les fourches d'un photo-interrupteur. La fréquence du signal ainsi obtenu est transmise vers l'unité centrale. La vitesse est calculée pendant un intervalle de 0,5 s, toutes les 0,5 s par 2 compteurs à fonctionnement alterné. L'axe de la girouette est solidaire d'un disque photosensibilité constitué de 6 couronnes concentriques constituées alternativement de secteurs noirs et de secteurs dorés. Six optocoupleurs à infrarouge sont disposés vis-à-vis de chacune de ces couronnes et déterminent le codage binaire du secteur (code Gray adapté).</p>	<p>Caractéristiques techniques : - Conditions assignées de fonctionnement : - températures : -25 °C à +70 °C - humidité : 10 à 100 % hors condensation. - Métrologie : - anémomètre : seuil de démarrage : 0,5 m/s, résolution : 0,1 m/s, gamme : 0 à 80 m/s, constante de distance inférieure à 3 m ; - girouette : résolution : 10°, précision : +3°, seuil de mobilité : 0,5 m/s, facteur d'amortissement entre 0,4 et 0,6</p>

3.2.2. Capteurs dédiés à la mesure de la neige

Les différents capteurs de neige présents sur les stations Météo-France sont les suivants.

3.2.2.1. Les observations automatiques

Les capteurs équipant les stations opérées par Météo-France sont : le CAMPBELL SR50A, le SOLIA 300, le JENOPTIK SHM30 et l'APICAL TLN35R, chacun de ces capteurs ayant ses spécificités propres :

- le capteur ultrasonique de type CAMPBELL SR50A permet de mesurer de fortes hauteurs de neige, pour les besoins de prévision des risques d'avalanches en montagne et des coulées de neige en moyenne montagne ;

- le JENOPTIK SHM30 et l'APICAL TLN35R (visée laser) sont plus précis pour les faibles hauteurs de neige tenant au sol, plus adapté pour la plaine ;
- le capteur SOLIA 300 fournit l'information de la présence de neige au sol (état du sol).

Dans le cas du JENOPTIK et de l'APICAL, l'incertitude de mesure est ± 5 mm sur une couche de neige existante, et de l'ordre de 1 cm pour le début de la tenue au sol. Elle atteint jusqu'à ± 2 cm pour les capteurs CAMPBELL SR50A utilisés principalement dans les stations de moyenne altitude et dans le réseau NIVOSE⁸².

3.2.2.2. Les différents capteurs sur les stations Météo-France

SOLIA 300

Pour répondre au besoin en mesures complémentaires de présence de neige au sol et de hauteur de neige en plaine, le premier capteur déployé a été le SOLIA 300, un capteur d'état du sol, qui permet également de déterminer une hauteur de neige.

Suite à quelques problèmes rencontrés dans cette mesure de hauteur de neige, seule l'information de la présence ou non de neige au sol (valeur 0 en l'absence de neige ou sinon valeur manquante) est transmise jusqu'aux bases de données. Dans le cas où un autre capteur de hauteur de neige est installé sur le même site, c'est ce dernier qui est prioritaire dans la fourniture de la donnée de hauteur de neige.

Tableau 25. Capteurs dédiés à la mesure de la neige

CAMPBELL SR50A

<p>Mesures effectuées : Le capteur SR50A mesure la hauteur de neige tombée au-dessus d'une surface de référence. Le capteur SR50A s'interface avec une Xaria ou une Opale qui délivre la hauteur de neige chaque minute. Il existe aussi une condition d'alerte sur l'augmentation de la hauteur de neige sur une heure.</p>	
<p>Principe : Le capteur SR50A détermine la distance entre le transmetteur et une cible (la surface de référence ou la surface de la neige) en émettant des pulsations ultrasoniques dans un cône de 30°. La distance est déduite du temps de transmission entre l'émission et la réception de l'écho. La vitesse du son dépendant de la température, une mesure indépendante de température est nécessaire. La mesure de la température de l'air sous abri est utilisée.</p>	<p>Caractéristiques techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etendue de mesure : 0 à 10 m. • Précision de mesure : le plus grand des 2 nombres : 1 cm, 0,4 % de la distance à la cible. • Résolution : 0,25 mm • Mesure de la hauteur brute de neige effectuée toutes les 3 secondes. • Consommation : 250 mA sous 16V pendant une mesure. • Température de fonctionnement : -30°C à 50°C

JENOPTIK SHM30

⁸² Réseau de stations météo automatiques de haute montagne.

<p>Mesures effectuées : -Mesure de la hauteur de neige - Puissance du signal rétrodiffusé pour discriminer l'état du sol</p>	
<p>Principe : Le capteur dispose d'une visée laser ponctuelle, ce qui lui permet de mesurer des hauteurs de neige avec une précision au millimètre. D'autre part, le capteur peut être positionné pour viser la plaque de référence en oblique, ce qui permet de limiter l'influence du support et du capteur lui-même sur la mesure.</p>	<p>Caractéristiques techniques : Gamme de mesure : 0-15m Incertitude : + 5mm Résolution : 1mm Consommation électrique : 0,5-1W, <12W avec le chauffage Alimentation : 10 ... 30 VDC (sans chauffage) 15 ... 24 VDC (avec chauffage) Classe du faisceau laser : 2 Signal de sortie : RS232 (9600 bauds, 8N1) Cadence de sortie : 15 secondes Dimension du capteur : 303 mm × 130 mm × 234 mm Poids : 2,5kg Gamme de fonctionnement : - en température : -40°C .. +50°C - en humidité : 0 ..100 %</p>

APICAL TLN35R

<p>Mesure effectuée : - Mesure de la hauteur de neige - Puissance du signal rétrodiffusé pour discriminer l'état du sol</p>	
<p>Principe : Le capteur dispose d'une visée laser ponctuelle, ce qui lui permet de mesurer des hauteurs de neige avec une précision au millimètre. D'autre part, le capteur peut être positionné pour viser la plaque de référence en oblique, ce qui permet de limiter l'influence du support et du capteur lui-même sur la mesure.</p>	<p>Caractéristiques Techniques : Gamme de mesure : 0-10m Incertitude : + 5mm Résolution : 1mm Consommation électrique : 0,5-1W, <12W avec le chauffage Alimentation : 24 VDC (avec chauffage) Classe du faisceau laser : 2 Signal de sortie : RS232 (9600 bauds, 8N1) Cadence de sortie : 15 secondes Dimension du capteur : 480 mm × 200 mm × 120 mm Poids : 3,9kg Gamme de fonctionnement : - en température : -40°C .. +50°C - en humidité : 0 ..100 %</p>

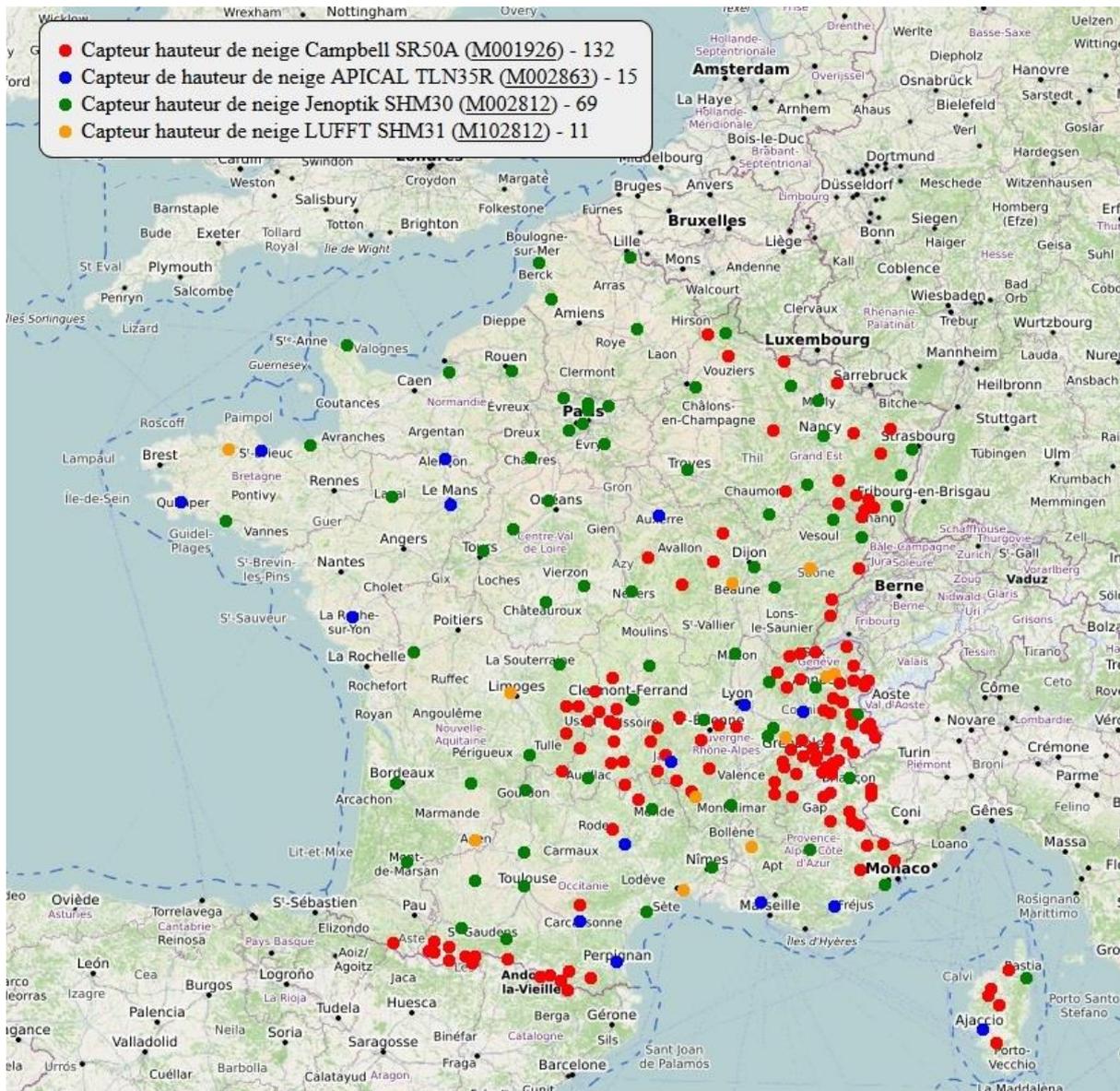


Figure 50 : Réseau de surface de mesure in-situ automatique de la hauteur de neige en métropole (01/03/2021)

3.3. Base de données climatologiques de Météo-France (BDCLim)

3.3.1. Contrôles qualité / codes qualité

L'expertise (par un météorologiste) des données du réseau de Météo-France se fait en deux temps :

- quotidiennement pour les données des stations automatiques temps réel et mensuellement pour les données des postes manuels.
- avant d'être expertisées par un météorologiste, ces données sont passées par les étapes décrites ci-après.

Les données candidates à l'insertion dans la BDCLim sont d'abord filtrées (i.e. que les données non plausibles sont rejetées), puis une fois insérées dans la base (données plausibles) elles subissent de nombreux contrôles automatiques de différents types (contrôle de plage, contrôle de variation temporelle, contrôle inter-paramètres, contrôles spatiaux...). Tout défaut sur un contrôle active une alarme pour une action d'expertise d'un météorologiste qui peut : soit valider la donnée, soit la corriger -s'il peut estimer la valeur erronée-, soit la mettre à manquant. Un code qualité accompagne la donnée et permet de connaître le niveau de validation de la donnée (validée, douteuse, non productible, ...) et le niveau d'action (mesurée, corrigée) sur la donnée.

3.3.1.1. Filtres

Les données en entrée de la BDCLIM sont d'abord soumises à différents filtres de cohérence. Toute donnée, quelle que soit son origine (synop, bufr, interactif, fichiers divers ...) y est soumise. Ces contraintes concernent des seuils absolus par paramètre et des contraintes absolues inter-paramètres (exemple le TN horaire doit être inférieur ou égal à la T horaire correspondante). Si une donnée ne passe pas les contraintes (exemple : direction de vent non comprise entre 0 et 360 degrés), elle n'est pas insérée dans la BDCLim.

3.3.1.2. Contrôles automatiques

Les données une fois insérées dans la BDCLim sont soumises à des contrôles automatiques. Ils sont lancés quotidiennement sur les données temps réel (« vieilles » de moins de 70 jours) ou peuvent être lancés à la demande sur les « données anciennes » (vieilles de plus de 70 jours).

Ces contrôles sont de plusieurs types :

- par rapport à des seuils relatifs (adaptés par station, mois et paramètre),
- temporels (par ex signalement d'écart trop important entre 2 températures horaires consécutives),
- cohérence inter-paramètres (exemple le TN quotidien doit être inférieur au TX quotidien),
- cohérence inter-tables (fréquence différente -exemple le TN quotidien doit être cohérent avec les TN horaires correspondants- i.e. tables différentes),
- capteur « bloqué »,
- spatiaux.

Ces contrôles automatiques émettent des alertes et pour certains modifient le code qualité associé à la donnée (code qualité mis à « validé » si aucun contrôle automatique ne détecte de problème, mis à « douteux » si un problème est détecté.

3.3.2. Paramètres vents disponibles

Les paramètres VENT disponibles aux pas de temps horaire et quotidien sont présentés ci-après.

Tableau 26. Paramètres VENT disponibles au pas de temps horaire dans la BDClim

FF		N(3,1)	force du vent moyennée sur 10mn, mesurée à 10m* (en m/s et 1/10)
DD*		SI	direction du vent moyennée sur 10mn, mesurée à 10m* (en rose de 360)
FXY		N(3,1)	valeur maximale de FF* dans l'heure (en m/s et 1/10)
DXY		SI	direction de FXY* (rose de 360)
HXY		SI	heure de FXY* (hhmm)
FXI		N(3,1)	force du vent instantané maximal dans l'heure, mesurée à 10m* (en m/s et 1/10)
DXI		SI	direction de FXI* (en rose de 360)
HXI		SI	heure de FXI*(hhmm)
FF2		N(3,1)	force du vent moyennée sur 10mn, mesurée à 2m* (en m/s et 1/10)
DD2		SI	direction du vent moyennée sur 10mn, mesurée à 2m* (en rose de 360)
FXI2		N(3,1)	force du vent instantané maximal dans l'heure, mesurée à 2m* (en m/s et 1/10)
DXI2		SI	direction de FXI2 (en rose de 360)
HXI2		SI	heure de FXI2 (hhmm)
FXI3S		N(3,1)	force maximale dans l'heure du vent instantané sur 3 secondes (en m/s et 1/10)
DXI3S		SI	direction de FXI3S (en rose de 360)
HXI3S		SI	heure de FXI3S (hhmm)

Tableau 27. Paramètres VENT disponibles au pas de temps quotidien dans la BDClim

FFM		N(3,1)	moyenne des forces du vent à 10m (en m/s et 1/10)
FF2M		N(3,1)	moyenne des forces du vent à 2m (en m/s et 1/10)
FXY		N(3,1)	force maximale du vent moyen à 10m (en m/s et 1/10)
DXY		SI	direction de FXY (en rose de 360)
HXY		SI	heure de FXY (hhmm)
FXI		N(3,1)	force maximale du vent maxi instantané (en m/s et 1/10)
DXI*		SI	direction de FXI (en rose de 360)
HXI		SI	heure de FXI (hhmm)
FXI2		N(3,1)	force maximale du vent instantané à 2m (en m/s et 1/10)
DXI2		SI	direction de FXI2 (en rose de 360)
HXI2		SI	heure de FXI2 (hhmm)
FXI3S		N(3,1)	force maximale du vent instantané sur 3s (en m/s et 1/10)
DXI3S		SI	direction de FXI3S (en rose de 360)
HXI3S		SI	heure de FXI3S (hhmm)

3.3.3. Paramètres neige disponibles

Les paramètres NEIGE disponibles aux pas de temps horaire et quotidien sont présentés ci-après.

Tableau 28. Paramètres VENT disponibles au pas de temps horaire dans la BDCLim

Unités : centimètres

Intitulé BDCLIM	définition
Données horaires	
HNEIGEF	hauteur de neige fraîche tombée en 6h (toujours renseigné aux heures synoptiques principales - 0h, 6h, 12h et 18h)
NEIGETOT	hauteur de neige totale au sol mesurée par bénévoles, postes nivo, stations nivoses
HNEIGEFI3	hauteur de neige fraîche tombée en 3h (facultatif aux heures synoptiques intermédiaires- 3h, 9h, 15h et 21h)
HNEIGEFI1	hauteur de neige fraîche tombée en 1h (facultatif aux heures non synoptiques).
Données quotidiennes	
HNEIGEF	Hauteur de neige tombée en 24 heures (06h-06h) qui reste au sol à 06h UTC
NEIGETOTX	Epaisseur maximale de neige quotidienne -une dizaine de postes dans les années 50 -une centaine de postes dans les années 60 -environ 400 postes au début des années 2000
NEIGETOT06	Epaisseur totale de neige mesurée dans H à 06h (neigetot de H à 06h00)
NEIG	Occurrence de neige (0 s'il n'a pas neigé, 1 s'il a neigé)

Paramètres élaborés (mensuels)

Intitulé BDCLIM	définition	compléments
HNEIGFTOT	Cumul mensuel de neige fraîche	Somme sur le mois des HNEIGEF
HNEIGEFAB	Epaisseur maximale de neige	Maximum sur le mois des HNEIGEF + date
NEIGETOTAB	Enneigement maximal	Maximum des NEIGETOT de H à 6h + date
NBJNEIG	Nombre de jours avec précipitation de neige	
NBJNEIGEF	Nombre de valeurs présentes de neige	

3.3.4. Accès aux données

Les données de la BDCLim sont accessibles via le portail « données publiques » de Météo-France : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

Selon les règles définies par les producteurs, les données de certaines stations peuvent être interdites à la vente : c'est le cas notamment pour le réseau SEMENCE.

3.4. Dispositif d'alerte : la Vigilance météorologique

3.4.1. Un dispositif d'avertissement sur les dangers météorologiques

Mise en place par Météo-France en 2001 suite au passage des deux tempêtes de l'hiver 1999 (Lothar et Martin), la vigilance est conçue pour informer les citoyens et les pouvoirs publics en cas de phénomènes météorologiques dangereux en métropole dans les prochaines 24 heures. L'information de vigilance complète les prévisions météorologiques et vise à attirer l'attention de tous sur les dangers potentiels d'une situation météorologique et à faire connaître les précautions pour se protéger.

La vigilance est également destinée aux services de la sécurité civile et aux autorités sanitaires qui peuvent ainsi alerter et mobiliser respectivement les équipes d'intervention, les professionnels et les structures de santé.

Pour déterminer le niveau de risque (la couleur de la vigilance) des critères de choix ont été définis pour chaque phénomène et pour chaque département. Ils tiennent compte de la sensibilité locale aux phénomènes météorologiques, en se basant sur les événements passés, les conséquences observées et le niveau d'acclimatation du département. Ainsi, quelques centimètres de neige peuvent suffire à perturber le trafic routier et le réseau de transports en commun à Marseille ou Paris, alors qu'ils n'ont que peu de conséquences dans les zones de montagne plus accoutumées.

3.4.2. 4 niveaux de vigilance pour 9 phénomènes

Actualisée au moins deux fois par jour à 6h et 16h, la carte de vigilance signale le niveau de risque maximal à l'échelle départementale pour les prochaines 24 heures à l'aide d'un code couleur.

En cas de phénomène dangereux de forte intensité, la zone concernée apparaît en orange. En cas de phénomène très dangereux d'intensité exceptionnelle, la zone concernée apparaît en rouge.

Les phénomènes concernés sont précisés à l'aide de pictogrammes. La vigilance couvre aujourd'hui 9 phénomènes : vent violent, vagues-submersion, pluie-inondation, crues, orages, neige-verglas, avalanches, canicules et grands froids. A noter qu'une même carte peut couvrir plusieurs phénomènes différents (par exemple : grand froid d'une part et neige/verglas d'autre part (cf. exemple ci-après).

Des seuils de hauteur de neige ont été établis par région, selon la densité de la population et les conséquences potentielles locales. La carte de vigilance rappelle également les précautions à prendre pour se protéger chez soi ou lors de ses déplacements.

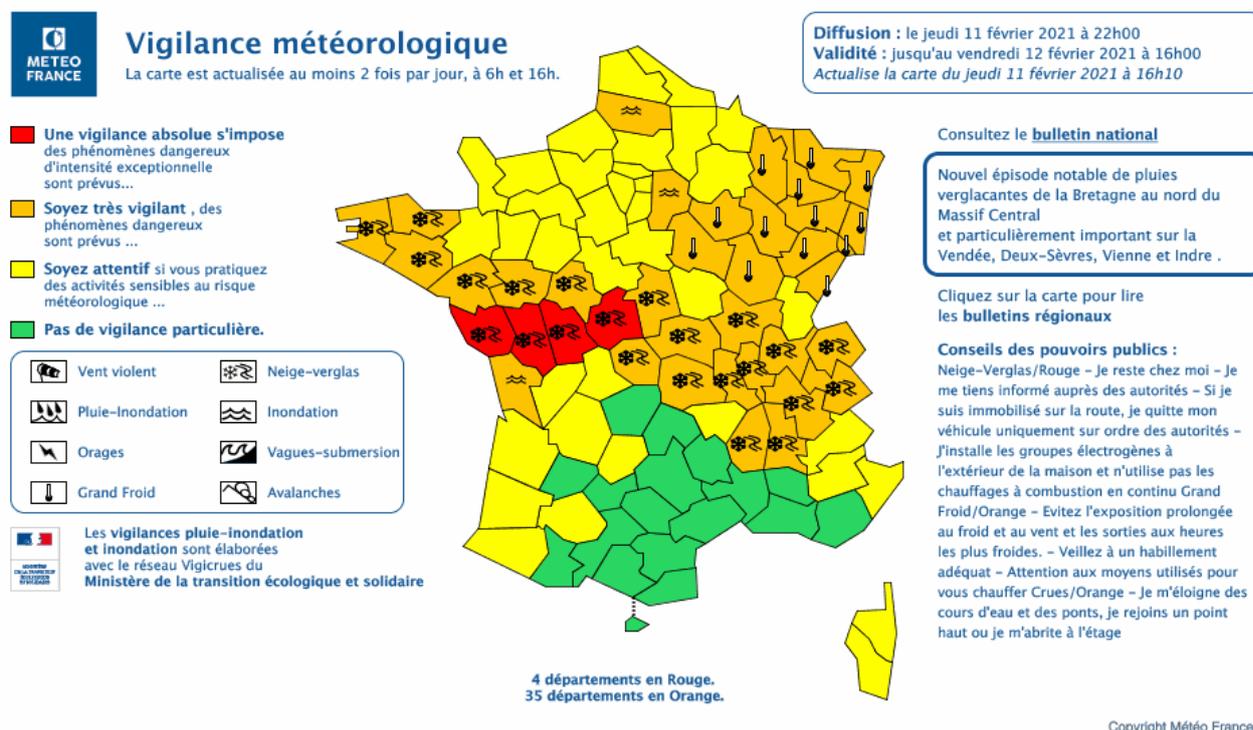


Figure 51 : Carte de Vigilance Météo-France du 11/02/2021 à 22h

Chaque département est ainsi coloré en rouge, orange, jaune ou vert selon la situation météorologique et le niveau de vigilance nécessaire. En cas de vigilance pour vagues-submersion, le littoral des départements côtiers concernés est également coloré.

Vigilance rouge : **une vigilance absolue s'impose**. Des phénomènes dangereux d'intensité exceptionnelle sont prévus. Tenez-vous régulièrement au courant de l'évolution de la situation et respectez impérativement les consignes de sécurité émises par les pouvoirs publics.

Vigilance orange : **soyez très vigilant**. Des phénomènes dangereux sont prévus. Tenez-vous au courant de l'évolution de la situation et suivez les conseils de sécurité émis par les pouvoirs publics.

Vigilance jaune : **soyez attentifs**. Si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique ou exposées aux crues, des phénomènes habituels dans la région mais occasionnellement et localement dangereux (ex. mistral, orage d'été, montée des eaux) sont en effet prévus. Tenez-vous au courant de l'évolution de la situation.

Vigilance verte : **pas de vigilance particulière**.

3.4.3. Des bulletins de vigilance

En vigilance orange ou rouge, la carte est accompagnée de bulletins de vigilance, actualisés aussi souvent que nécessaire. Ils précisent l'évolution du phénomène, sa trajectoire, sa localisation, son intensité et sa fin, ainsi que les conséquences possibles de ce phénomène et les conseils de comportement définis par les pouvoirs publics. Ces bulletins répondent aux questions que chacun peut se poser : quand le danger va-t-il arriver, de quelle ampleur peut-il être, quels sont les événements passés comparables en termes de fréquence ou d'intensité, quelles peuvent en être les conséquences, quels conseils suivre, quand le prochain bulletin sera-t-il publié, quand le phénomène devrait-il quitter la région, etc.

Des conseils élaborés par les pouvoirs publics sont indiqués sur la carte dans les bulletins de vigilance : ils sont simples et adaptés à chaque phénomène. Les préfetures et les mairies, relayées par les médias locaux, pourront compléter et préciser ces conseils.

3.4.4. Où trouver la carte de vigilance ?

L'information de vigilance est consultable en permanence sur le site de Météo-France ou directement sur le site vigilance. Sont également disponibles sur ce même site (onglet « Les prochains jours ») des prévisions de probabilité des phénomènes dangereux pour des échéances un peu plus longues (2-3 jours et 4-7 jours), permettant une meilleure anticipation de la gestion des risques par les services de l'État, collectivités territoriales et entreprises concernées.

La carte de vigilance est également disponible depuis 2008 dans l'application mobile de Météo-France et depuis 2013 sur le compte Twitter @VigiMeteoFrance. L'application mobile permet en outre de s'abonner à des notifications vigilance (passage en orange et rouge) pour le département ou la commune de son choix : Service VigimetFlash.

La vigilance est enfin largement diffusée et relayée par l'ensemble des médias.

3.4.5. Partenaires de la Vigilance

La carte de Vigilance élaborée par Météo-France est le résultat d'une collaboration avec :

- la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (Ministère de l'Intérieur),
- la Direction Générale de la Prévention des Risques (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire),
- la Direction de la Santé (Ministère des Solidarités et de la Santé)
- la Direction Générale des Infrastructures de Transport (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire),
- Santé Publique France, l'agence nationale de santé publique (établissement public sous tutelle du Ministère des Solidarités et de la Santé),

- le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (établissement public sous tutelle du Ministère de la Défense).

La **Vigilance crues** est élaborée par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) et les Services de Prévision des Crues (SPC) du Ministère de la Transition Ecologique

La **Vigilance pluie-inondation** est élaborée par Météo-France avec le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) et les Services de Prévision des Crues (SPC) du Ministère de la Transition Ecologique.

3.4.6. Performance de la vigilance

Avertissement ou alerte ?

La vigilance météorologique est souvent assimilée à un dispositif d'alerte. Les deux termes renvoient pourtant à des procédures distinctes.

La vigilance constitue en effet un avertissement, une première information qui peut conduire à l'activation d'une procédure d'alerte des populations accompagnée de consignes comme l'ordre d'évacuation ou de mise à l'abri.

L'alerte est du ressort des autorités de gestion de crise.

Rapport de Vigilance

Le dispositif de vigilance fait l'objet d'une évaluation a posteriori systématique par un comité national de suivi réunissant tous les partenaires de la vigilance, y compris des représentants des autorités chargées de la mise en protection des personnes, des biens et des services. Pour être fiable et utile, le dispositif de la vigilance doit limiter autant que possible à la fois le nombre de fausses alarmes et le nombre de non-détections.

La publication d'un rapport de Vigilance est réalisée chaque année par Météo-France. Le rapport de Vigilance 2021 présente des scores sur l'évaluation des épisodes de vigilance 2021 à Météo-France.

Dans le tableau ci-dessous, les statistiques de la vigilance météorologique ne prennent pas en compte les phénomènes de canicule, grand froid, avalanche et crues. Les statistiques relatives aux crues sont présentées dans le bilan de la vigilance crues.

Tableau 29. Statistiques de la vigilance météorologique à Météo-France

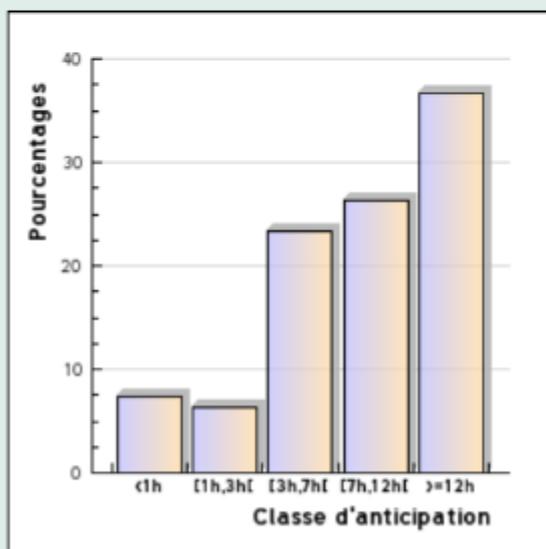
Indicateurs départementaux	2008	2009	2010	2011*	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Taux de fausses alarmes	18 %	17 %	14 %	20 %	10 %	12 %	10 %	13 %	14 %	18 %	10 %	12 %	10 %	14 %
Taux de non-détection	1,9 %	1,7 %	1,5 %	8,2 %	4,0 %	3,0 %	3,4 %	3,1 %	4,1 %	2,9 %	1,9 %	1,4 %	6,7 %	1,7 %

* En 2011, deux nouveaux phénomènes ont été intégrés à la vigilance : inondation et vagues-submersion.

Les indicateurs de la vigilance

Une fausse alarme est considérée lorsqu'un département a été placé en vigilance orange et que le phénomène météorologique prévu ne s'y est pas produit, ou s'est produit avec une intensité ou des conséquences moindres qu'attendu. Cela ne signifie pas nécessairement que le niveau de vigilance orange ne se justifiait pas au moment de l'évaluation des risques. Les évaluations successives du dispositif de la vigilance révèlent que les fausses alarmes correspondent généralement à des cas où le phénomène se produit avec une intensité légèrement inférieure aux critères de vigilance orange.

	<1h	[1h,3h[	[3h,7h[	[7h,12h[	>=12h	>=1h	>=3h	>=7h	total
Nombre	13	11	41	46	64	162	151	110	175
Taux	7.4 %	6.3 %	23.4 %	26.3 %	36.6 %	92.6 %	86.3 %	62.9 %	100%



avec anticipation [1, 3h[	1 %
avec anticipation [3, 7h[	21 %
avec anticipation [7, 12h[	20 %
avec anticipation >= 12h	51 %

Annexe 4. Mesures de vent existantes sur les sites nucléaires

4.1. Récapitulatif des mesures faites sur les stations météorologiques des sites nucléaires

Cette annexe recense les informations transmises par les exploitants d'installations nucléaires existantes (ou en projet) concernant leurs stations météorologiques sur site. En particulier :

- l'emplacement, la hauteur et l'environnement immédiat de la station (et les évolutions associées),
- le système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition),
- l'organisation de l'exploitation et de la maintenance,
- la gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre),
- les éléments complémentaires divers disponibles.

4.2. ANDRA - Centre de stockage de la Manche (Digulleville)

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)



Station de prélèvement atmosphérique et transmetteur météorologique multi paramètres (pluviométrie, température, pression atmosphérique, vitesse et direction du vent et hygrométrie) + un paratonnerre conforme aux normes en vigueur et installé au-dessus du transmetteur (Crédits photos : Andra, Biplan).

Position du mât : 7 m

Nota : système installé en 2015 pour la surveillance atmosphérique et non pour un suivi météo du Centre. Le CSM dispose d'un protocole d'échanges avec ORANO qui fournit les informations relatives aux relevés météorologiques.

Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)

WindSonic4 et WindSonic1 de Campbell scientific

Capteur : anémomètre sonique à 2 dimensions, Tension d'entrée : 9 à 30 Vcc⁸³, Signal de sortie : SDI-12 version 1.3

Mesure la vitesse et la direction du vent :

DIRECTION DU VENT

- Gamme de mesure : 0° à 359° (pas de bande morte)
- Exactitude de mesure : ±3°
- Résolution : 1°

VITESSE DU VENT

- Gamme de mesure : 0 à 60 m/s
- Exactitude de mesure : ±2 % (@ 12 m/s)
- Résolution : 0,01 m/s

Mesures en continu de vent instantané

Centrale d'acquisition de données : l'anémomètre est connecté au SICM (Système informatique de centralisation des mesures)

Organisation de l'exploitation et de la maintenance

Maintenance préventive et curative de la station de prélèvement atmosphérique et du transmetteur météorologique incluant les vérifications périodiques et les étalonnages pour une durée de 5 ans réalisées par une entreprise extérieure

Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)

Les mesures transmises par les capteurs sont compatibles pour être traitées par le SICM.

Les messages d'erreurs sur le fonctionnement et/ou l'état du capteur sont transmises au SICM ;

Les mesures réalisées par le transmetteur météorologique sont également disponibles en local à l'intérieur de la station atmosphérique.

Archivage des mesures au pas de temps horaire dans un système de base de données Windows compatible avec les requêtes SQL

Vitesses moyennes horaires disponibles (pas de vitesse moyenne 10 min enregistrée)

Exploitation du SICM gérée en interne ANDRA Maintenance préventive du SICM réalisée par une entreprise extérieure

⁸³ Voice call continuity / Alimentation Tension Continue

4.3. ANDRA – Centre de Stockage de l’Aube (Soulaines-Dhuys)

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)



La station météorologique XARIA a été mise en place en 2005 (remplaçant une station Miria mise en place dans les années 1990).

1 mât avec un système d’acquisition situé à 10 m et un second à 17 m relevant la direction et la vitesse du vent.

La station météorologique comprend la station d’acquisition XARIA obsolète. Elle sera remplacée par une station nouvelle car système de concentration des données est différent de celui de MF (Nouveaux capteurs prévus : capteurs Thies ultrasoniques (pas d’opérations métrologiques)).

Système d’acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d’acquisition)

Type d’appareil : 2 anémomètres, 2 girouettes

La station est composée d’un coffret de centralisation des données et un mât (datant des années 1990) permettant de faire des mesures en continu de vent instantané à 10 et 17 mètres.

Temps d’acquisition : 1 min, 6 min et 1h

Organisation de l’exploitation et de la maintenance

Une unité de la station envoie les relevés bruts au logiciel ANDRA WDDP et à Météo-France. Météo-France contrôle et valide les données issues des différents capteurs.

Maintenance préventive :

- Sur les capteurs : Météo-France effectue un entretien préventif comprenant deux visites de contrôle chaque année. Cette maintenance est réalisée en respectant un plan de maintenance défini par Météo-France. Un compte rendu d’intervention avec préconisations est établi à la suite de chaque visite.
- Mises à jour des versions des logiciels : Météo-France assure le suivi des versions de logiciels et firmware des capteurs et centrales d’acquisition de la station.

Maintenance curative : une visite curative annuelle

Météologie : les anémomètres et girouettes actuels nécessitent un étalonnage annuel. Ce qui ne sera plus le cas pour la nouvelle station.

Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)

Le logiciel WDDP permet de gérer l’exploitation d’une ou plusieurs stations météorologiques automatiques.

Il assure principalement :

- La configuration du système ;
- La récupération de manière automatique ou manuelle des données météorologiques ;
- La télé-configuration des stations ;

- L'archivage des données dans un système de base de données Windows compatible avec les requêtes SQL standard ;
- La consultation graphique et alphanumérique des données.

Données brutes disponibles :

- Maximum de la vitesse instantanée du vent sur la dernière minute ;
- Moyenne de la vitesse du vent sur les 2 dernières minutes ;
- Maximum de la vitesse instantanée du vent sur les 10 dernières minutes ;
- Moyenne de la vitesse du vent sur les 10 dernières minutes ;
- Minimum de la variabilité de la vitesse sur les 10 dernières minutes (calculé à partir des moyennes 3 secondes) ;
- Maximum de la variabilité de la vitesse sur les 10 dernières minutes (calculé à partir des moyennes 3 secondes) .

Données disponibles après vérification et validation des données brutes par Météo-France : direction et force max du vent (vitesse rafale) par jour.

Le système de base de données est une fonction de Windows qui permet d'utiliser des fichiers au format texte comme table de stockage.

Eléments complémentaires divers disponibles.

Information sur l'ancienne station MIRIA :

- Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station : pas de changement par rapport à la station actuelle.
- MIRIA effectuait les mêmes mesures que la station actuelle : mesure en continu de directions et vitesses de vent instantané à 10 m et 17 m avec enregistrement des données minute, données 6 minutes et données horaires.
- Le changement des capteurs a été fait afin de les adapter à la technologie de la nouvelle station météo. Toutefois, les types de capteurs restent les mêmes (anémomètre et girouette).

4.4. CEA - Cadarache

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)

Station Verrerie (agrée Météo-France classe 3 pour le vent)

Hauteur du pylône 15 m

Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)

De 2004 au 11/12/2019 :

- Station : Xaria
- Capteur : DEOLIA 96
- Direction - vitesse moyennée sur 2mn et 10 min - vitesse max
- Plages de mesures :
 - Vitesse : 0,4-80 m/s
 - Direction : 0-360°

Depuis 11/12/2019 :

- Station : Mercury
- Capteur : anémomètre ultrasonique 2D Compact Thies
- Direction - vitesse moyennée sur 10 min - vitesse max
- Plages de mesures :

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vitesse :0-65 m/s ➤ Direction :0-360° • Précision : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vitesse : ±2 % ➤ Direction : ± 2° <p>Les données sont transmises toutes les minutes sur le réseau de surveillance CEA.</p>
Organisation de l'exploitation et de la maintenance
Maintenance réalisée par Météo-France
Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)
Les données transmises sont archivées sur une base de données interne. Transmission à Météo-France : <ul style="list-style-type: none"> • Réseau SEMENCE • Serveur interne à Météo-France

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)
Station Grande Bastide Hauteur du pylône 110 m
Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)
<p>Avril 2009 à Octobre 2018 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capteur : Anémomètre ultrasonique 3D Metek • Direction et vitesse instantanée toutes les minutes • Plages de mesures : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vitesse : 0-60 m/s ➤ Direction : 0-360° <p>Depuis Octobre 2018 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Station Mercury • Capteur : Anémomètre ultrasonique 2D compact Thies • Direction - vitesse moyennée sur 10 min - vitesse max • Plages de mesures : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vitesse 0-65 m/s ➤ Direction 0-360° • Précision : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vitesse : ±2 % ➤ Direction : ±2° <p>Les données sont transmises toutes les minutes sur le réseau de surveillance CEA.</p>
Organisation de l'exploitation et de la maintenance
Maintenance réalisée par Météo-France depuis Octobre 2018
Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)
Les données transmises sont archivées sur une base de données interne. Transmission à Météo-France (Réseau SEMENCE)

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)
Station Cabri

Hauteur pylône 10 m
Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)
<p>Depuis Avril 2021 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Station Mercury • Capteur : anémomètre ultrasonique 2D compact Thies • Direction - vitesse moyennée sur 10 min - vitesse max • Plages de mesures : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Vitesse 0-65 m/s ➢ Direction 0-360° • Précision : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Vitesse : ±2% ➢ Direction : ± 2° <p>Les données sont transmises toutes les minutes sur le réseau de surveillance CEA.</p>
Organisation de l'exploitation et de la maintenance
Maintenance réalisée par Météo-France
Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)
Les données transmises sont archivées sur une base de données interne.

4.5. EDF

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)
<p>Générique</p> <p>Un mât de 10 m est présent sur l'ensemble des sites, avec des mesures de vitesse et direction du vent.</p> <p>Spécificité de sites :</p> <p>En fonction de l'orographie, EDF dispose en plus soit un mât standard à 80 m, soit d'une station météo équipée d'un sodar (le sodar envoie des ondes sonores dans l'atmosphère et mesure le déphasage en fréquence à différentes altitudes).</p> <p>Par ailleurs, des capteurs, ultrasoniques peuvent être utilisés avec une mesure entre deux capteurs situés à 80 cm à l'un de l'autre, comme à Flamanville). Les types de mesures réalisés dépendent de choix fait à la conception du site.</p>
Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)
<p>Générique</p> <p>Les mesures de vent sont des mesures instantanées à pas de temps fin (6 secondes).</p> <p>Des moyennes sur 10 min sont réalisées et enregistrées, conformément aux préconisations de la RFS éléments complémentaires divers disponibles.</p> <p>L'accès aux mesures de vent instantanées nécessiterait de modifier le software de l'équipement, ce qui serait coûteux. Météo-France héberge les données sur son serveur SEMENCE, par lequel EDF accède à ces données. Sur les données Sodar, les informations de vitesse et directions sont remontées au système d'information local du site. In fine, les données Sodar archivées sont les données 10 min et par palier dans l'atmosphère. Mais sur le Sodar en lui-même, il y a d'autres données accessibles. Pour rappel, les Sodars, technologie par ondes sonores, ne sont pas adaptés à la mesure des vents forts.</p>
Organisation de l'exploitation et de la maintenance
Générique

L'évolution de l'environnement de la station est suivie et tracée par un prestataire AMI CEPAM qui effectue également le suivi et la maintenance des stations Météo-France (évolution de l'environnement, données d'étalonnage et état du matériel).

Un compte-rendu de visite réalisé par le prestataire est envoyé à Météo-France qui le retransmet ensuite à EDF.

Une classe environnementale est attribuée en se référant au protocole Météo-France.

Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)

Générique

Sur le taux de données manquantes, les capteurs ne tombent quasiment jamais en panne, mais la chaîne de transmission du signal pose des problèmes récurrents (transmission filaire coupée intempestivement, modems à changer, etc.) ainsi que des pannes de serveurs.

Le critère de 90 % de données valides indiqué dans la RFS est obtenu sur site mais pas sur les données stockées. EDF a mis en place une affaire Parc sur le sujet avec à terme, un doublement des voies de transmission par voie hertzienne.

EDF ne mène pas en interne de travail particulier de validation des données Semence.

Dans le cadre de l'accord Semence, Météo-France réalise des études de cohérence de ces données : contrôle des cohérences spatiale, temporelle et entre paramètres. Ces contrôles activent des alarmes le cas échéant, un expert peut valider, corriger ou rejeter la donnée. Il rappelle qu'il y a un code qualité associé à chaque donnée.

4.6. ORANO – La Hague

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)

La station est implantée au sein du site ORANO La Hague, dans la partie au Nord-Ouest et répond aux exigences réglementaires liées aux autorisations de rejets du site (décisions ASN n°2015-DC-0535 et 2016-DC-0569)

Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)

Acquisition :

- MIRIA (référence) : station météo classique (avec agrément), avec mât de dix mètres
 - o Vitesse et direction du vent à 10 m,
 - o Anémomètre : entre 0,4 et 80 m/s avec une précision de 0,1 m/s,
 - o Girouette : 36 secteurs de 10°
- SODAR : système acoustique (écho d'une onde ultrasonore émise par une antenne) réalisant des mesures à altitude élevée (cheminées principales de 100 m) :
 - o Vitesse et direction du vent de 75 m à 200 m (par pas de 25 m),
 - o Vitesse verticale (turbulence) de 75 m à 200 m (par pas de 25 m),
 - o Vitesse : 0 à 35 m/s, précision de 10 %,
 - o Direction : précision de 5°
- USA-1 (mesure complémentaire, anémomètre ultrasonique) :
 - o Vitesse et direction du vent à 10 m,
 - o Vitesse verticale du vent à 10 m,
 - o Vitesse à une précision de 0,05 m/s,
 - o Direction à une précision de 4°,
 - o Vitesse verticale à une précision de 0,02 m/s.

Acquisition toutes les 10 min (moyenne)

Organisation de l'exploitation et de la maintenance

Sous la responsabilité de la Direction Sûreté, Sécurité, Environnement et Protection (DSSEP) du site ORANO La Hague.

Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)

Archivage sous support informatique (consultable au format Excel), avec l'ensemble des données.
Résumé annuel dans un document de synthèse

Éléments complémentaires divers disponibles.

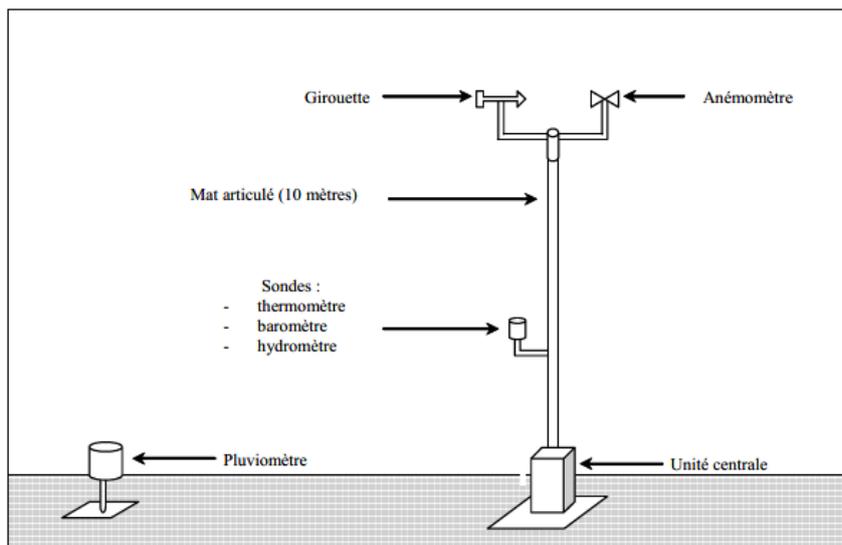
Données exploitées pour le vent en complément de celles prises en compte précédemment par transfert depuis des sites Météo-France (référence actuelle pour l'établissement des vents extrêmes)

Voir le Rapport annuel de surveillance disponible dans les [Publications de référence d'ORANO](#) (page 82 de [la version 2021](#))

4.7. FRAMATOME – Romans-sur-Isère

Emplacement, hauteur et environnement immédiat de la station (et les évolutions associées)

La station est située au nord de l'établissement entre le poste de garde (PE2) et le bâtiment administratif (BA). Elle peut être schématisée de la façon suivante



Système d'acquisition (paramètres mesurés, type de capteur, pas de temps d'acquisition)

station météorologique DEGREANE de type XARIA conforme aux prescriptions de Météo France.

Mesures effectuées :

- vitesse horizontale du vent à 10 m :
 - capteur : anémomètre DEOLIA 300,
 - fournisseur : DEGREANE,
 - plage de mesure : 0,5 à 80 m/s,
 - Résolution : 0.1 m/s,
 - Enregistrement :
 - DDF10: moyenne sur 10 minutes de la force du vent,
 - VRB FF: variabilité sur 10 minutes de la force du vent.
- direction du vent à 10 m :
 - capteur : Girouette DEOLIA 300,
 - fournisseur : DEGREANE,

- Plage de mesure : 0 à 360°,
- Résolution : 5°.

Enregistrement toutes les minutes des données suivante (aussi bien pour la vitesse que pour la direction) :

- Maximal instantané sur 2 minutes,
- Maximal instantané sur 10 minutes,
- Moyenne sur 2 minutes,
- Moyenne sur 10 minutes,
- VRB DD: variabilité sur 10 minutes (VRB FF10 et VRB DD).

Gestion des données acquises et archivées (système de gestion, contrôle qualité mis en œuvre)

Les données sont dirigées sur le réseau intranet et traitées grâce à l'application « Xaria-Conf ». Toutes les données sont sauvegardées depuis l'installation de la station, fin 2002.

Éléments complémentaires divers disponibles.

Autres mesures effectuées

- Précipitations,
- Humidité sous abri,
- Pression atmosphérique,
- Température sous abri.

4.8. ANDRA - Projet Cigéo (Meuse / Haute-Marne)

4.8.1. Contexte du site et des installations

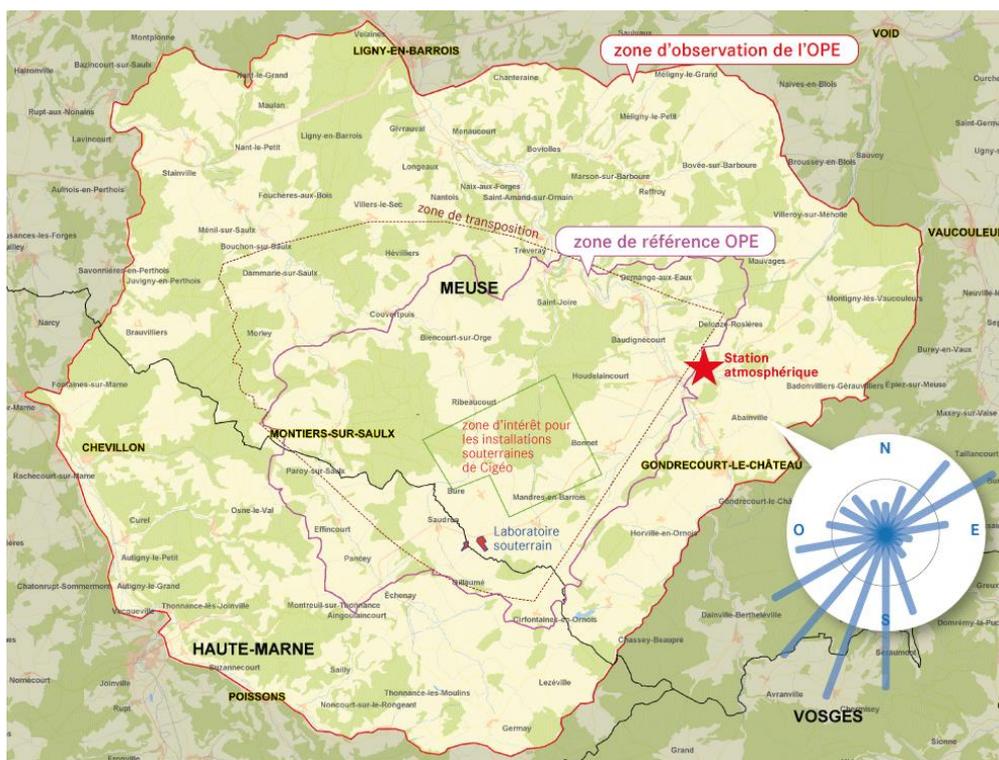
En support au projet CIGEO de stockage en formations géologiques profondes des déchets radioactifs et haute et moyenne activité à vie longue (HA-MAVL), l'ANDRA a implanté :

- le laboratoire souterrain comprenant des installations en surface et à 500 m de profondeur,
- un espace technologique,
- l'observatoire pérenne de l'environnement (OPE) doté d'une écothèque.

Dans ce cadre, l'ANDRA a implanté plusieurs stations météorologiques :

- la station EST6000 dans le périmètre du Laboratoire Souterraine, en service depuis juin 2001 ;
- la station de Houdelaincourt dans le cadre de l'OPE. Cette station, en service depuis 2010, est intégrée au réseau RADOME de Météo-France.

Les données de ces stations sont utilisées en support aux études conduites pour le projet CIGEO.



4.8.2. Documentation

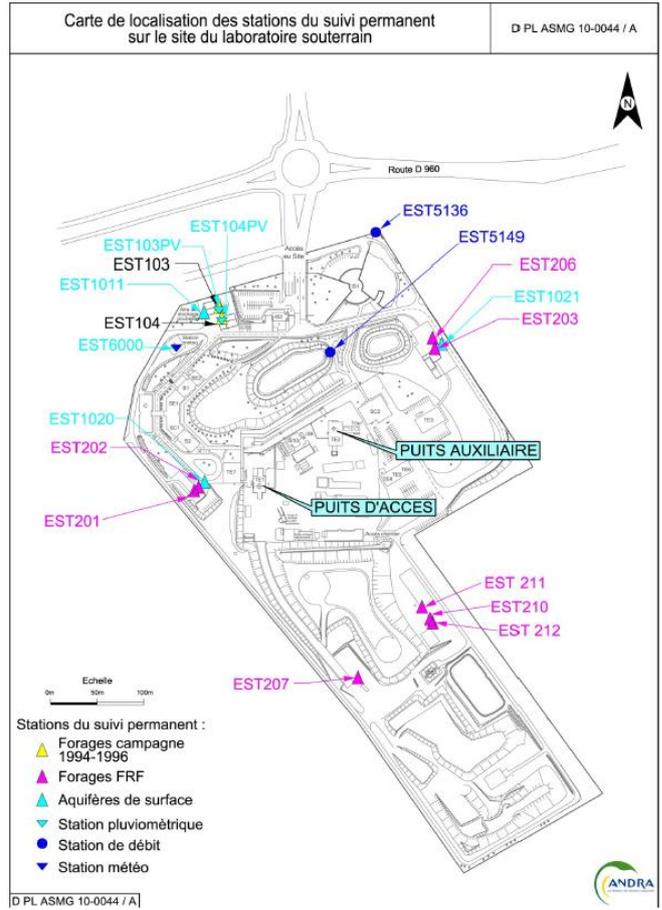
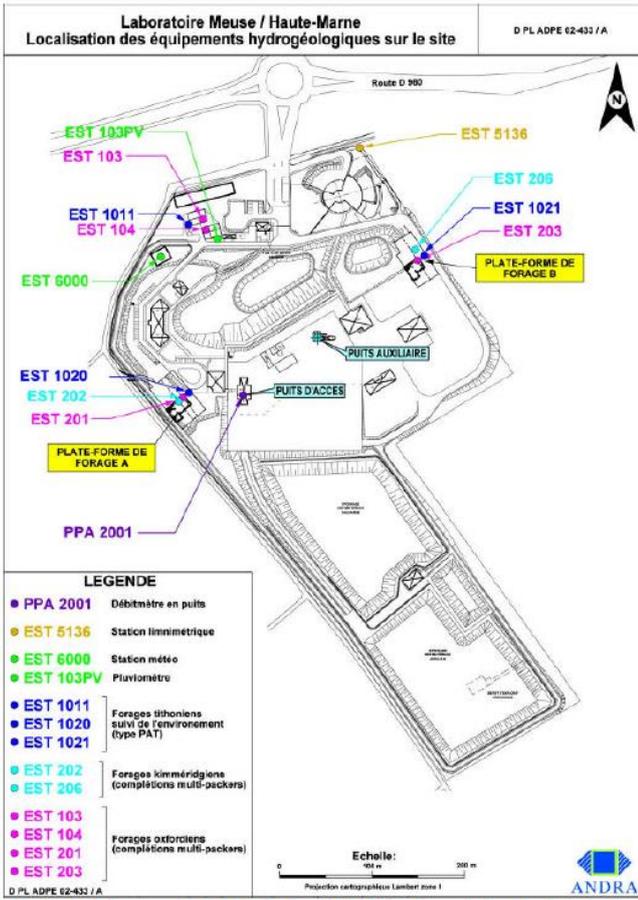
Le descriptif de la station EST6000 donné ci-après a été établi à partir d'une documentation exhaustive existante comprenant à la fois :

- des illustrations photographiques de l'environnement de la station météorologique,
- des historiques techniques documentant les opérations réalisées sur la station,
- des programmes de maintenance,
- des notes techniques présentant des bilans annuels de fonctionnement des mesures.

4.8.3. Localisation et environnement immédiat

La localisation de la station météorologique EST6000 en 2001 au sein du Centre ANDRA est illustrée ci-dessous.

Son emplacement n'a pas été modifié depuis son installation initiale. Par contre l'environnement autour de la station a évolué. Le plan ci-dessous illustre la situation en 2010.



La série de photos ci-dessous illustre l'évolution du site depuis l'installation en juin 2001 jusqu'à Juin 2020. L'aménagement du site dans son ensemble a évolué au cours des 20 ans tout comme les abords immédiats de la station météorologique avec des changements de végétation (processus lent) et du bâti (processus plus rapide).



Juin 2001



Octobre 2002



Juillet 2007



Juillet 2010



Juin 2020

4.8.4. Système de mesures

Entre 2001 et 2008, la station météorologique a été composée de deux centrales d'acquisition de type Logicap CR2M. Une centrale avait en charge l'acquisition de la pluviométrie et de la vitesse et direction du vent au pas de temps 15 minutes calée sur le quart d'heure rond. Les variables mesurées sont des valeurs instantanées non intégrées (sauf pour les précipitations qui sont un cumul).

Sur cette période les caractéristiques des capteurs sont les suivantes :

Tableau 30. Caractéristiques des capteurs de la station météorologique EST 6000

capteur	Gamme de mesure	Résolution	précision
capteur barométrique type PTX611	80 – 120 kPa	0,01 kPa	± 0,08 % pleine échelle
Sonde de température type PT104F	-20 °C / +50 °C	0,1 °C	± 0,15 °C
Sonde d'humidité relative	0 – 100 %	0,1 %	± 2 % (0-90 %) ou ± 3 % (90-100 %)
Pluviomètre chauffant à auget type 3030	-	0,2 mm	0,2 mm
Capteur de vitesse du vent type Thies 4.3519.00.141	0,5 m/s – 50 m/s	0,1 m/s	± 0,5 m/s ou ± 3 %
Capteur de direction du vent type Thies 4.3129.00.141	0° – 360°	11,25°	± 5°

Entre 2001 et 2008, la société HydroInvest a eu en charge l'exploitation et la maintenance de cette station météo EST6000.

A partir de 2008, l'acquisition des mesures est réalisée sur une centrale d'acquisition unique CR3000 de Campbell Scientifique au pas de temps 15 minutes, calé au quart d'heure rond pour tous les paramètres. Entre 2008 et 2011, c'est la société SolData qui a eu en charge l'exploitation et la maintenance de cette station météo EST6000. A partir de 2012, l'ANDRA a exploité et maintenu la station directement. Les capteurs sont les mêmes avec les mêmes caractéristiques.

Le système d'acquisition de la station météorologiques EST6000 ne permet pas la caractérisation des paramètres météorologiques de température et de direction et de vitesse de vent suivant les recommandations des services météorologiques. En effet les paramètres sont acquis au pas de temps de 15 minutes. Il n'est donc pas possible d'estimer directement ni des vents moyens 10 minutes ni des vents instantanés maximum.

De plus, la gamme de mesure donnée par le constructeur qui est indiquée limitée à 50 m/s.

4.8.5. Base de données

Les données météorologiques de cette station sont acquises, calculées, archivées puis distribuées via une base de données dénommée SAGD (Système d'Acquisition et de Gestion des Données). Cette base de données intègre également un outil de logbook permettant de renseigner et de consulter les événements associés aux données (opérations de maintenance, calibration, ...)

Annexe 5. Analyse des records de vent : méthode de normalisation retenue

5.1. Concept

La normalisation des observations de vent présentée ici a été développée par le CSTB et utilisée dans plusieurs de leurs études notamment l'étude de 2005 sur la cartographie des vents extrêmes en France Métropolitaine [19]. Elle a pour but d'obtenir la vitesse de référence correspondant à une observation réelle.

En effet, la situation de référence utilisée lors des démarches Eurocodes correspond à des conditions précises et définies :

- capteur de vent à 10 m de hauteur,
- rugosité de catégorie II correspondant à un terrain plat ouvert, recouvert uniquement d'herbe et de rares obstacles isolés,
- sans obstacles alentours.

Ces conditions ne sont pas effectives pour l'ensemble des anémomètres. Elles sont cependant nécessaires pour comparer les valeurs tirées de plusieurs sites d'observations, ou les utiliser dans les démarches Eurocodes. La normalisation permet de pallier cette difficulté.

Cette méthode de normalisation se fonde sur 3 coefficients :

- le coefficient de rugosité (ramener le site à la rugosité de rase campagne),
- le coefficient de topographie (reliefs tels que collines et vallons),
- le coefficient de sillage (obstacles proches tels que bâtiments, haies, arbres),

Ces coefficients sont déterminés pour des vents moyens sur 10 minutes, pour chaque station chaque secteur de direction de 20°.

Les détails des calculs des coefficients correspondants et des effets sont disponibles dans le rapport CSTB [19].

Il est important de ne pas confondre la procédure de normalisation, qui a pour but d'obtenir un vent de référence sur le site où sont prises les mesures, de la procédure de transfert, qui consiste à transposer les vents depuis la station météorologique vers le site d'intérêt. Ceux-ci sont propres à la variable utilisée.

5.2. Exemples d'application

Le tableau ci-dessous présente un exemple d'application des coefficients de normalisations à diverses stations.

Tableau 31. Influence de la correction sur 3 stations météorologiques.

Station	Date du record	Valeur du record brute (m/s)	Valeur du record normalisée (m/s)
Solenzara	22/02/1999	26	34,05
Pointe de Penmarch	15/10/1987	49	31,76
Dinard	26/12/1999	28	27,72

Le maximum brut observé pour la station de Solenzara est de 26 m/s lors de la tempête de 1999. Après normalisation, la valeur obtenue est plus importante. A l'opposé, la valeur de record obtenue pour la station de la Pointe de Penmarch est réduite par la normalisation (dans ce cas, la présence de la mer autour de la pointe

produit une rugosité locale plus faible que la rugosité de référence (« rase campagne »). Enfin, la station de Dinard est proche des conditions de référence et la normalisation impacte peu les valeurs.

5.3. Limites

Il est nécessaire d'appliquer la normalisation avant toute sélection d'événements de type record, maximum annuel, seuil... Certaines directions sont plus fortement impactées à la baisse ou à la hausse suivant les obstacles et le terrain environnant. Il est possible que son application change la date ou la direction d'un record, et donc la sélection qui en découle.

Tableau 32. Exemples de stations pour lesquelles la normalisation change la date du record.

Station	Date avant normalisation	Valeur du record brute (m/s)	Date du record après normalisation	Valeur du record normalisé (m/s)
Le Puy-Loudes	22/04/1996	23	18/12/1989	26,32
Caen-Carpiquet	26/11/1983	29	16/10/1987	26,15

Dans le cas de la station du Puy-Loudes, la sélection du record sur des données brutes conduit à un vent de 23 m/s en 1996. Cependant, après application de la normalisation, le nouveau maximum est de 26 m/s en 1999.

De même pour la station que Caen-Carpiquet. Le record brut mesuré en 1983 voit sa valeur réduite par l'application de la normalisation. Une autre mesure, datant de 1987, se révèle alors être le record des valeurs normalisées.

Pour ces deux stations, le record sur les données brutes a lieu à une date différente du record sur les mesures à l'état de référence.

Cette limite dans la sélection des records apparaît généralement lorsque les différentes directions autour de la station présentent des situations orographiques différentes. Un exemple extrême serait une station dont l'Ouest et le Sud sont une mer ouverte, et l'Est et le Nord une falaise boisée. Il est donc important d'appliquer la normalisation avant la sélection des records.

L'utilisation de la normalisation peut poser problème car les coefficients utilisés ici n'ont pas été mis à jour depuis 2003, ce qui met en doute leur validité pour une application aux des données plus récentes (ex : 2003-2018). En effet, il est probable que l'environnement des stations a évolué pendant cette période.

Annexe 6. Analyse des records de neige

Les records de neige au sol mesurée « Hneige » sont issus des mesurées en plaine à une altimétrie inférieure à 400 m, réalisées toutes les 24 h sur les stations Météo-France. Ils sont représentés dans la carte ci-dessous (fichier de donnée transmis par Météo-France en février 2021 transmis dans le cadre des travaux du GT). Il s'agit de records de hauteurs de neige maximum en 24 h (« Hneige »), qui sont des mesures de neige totale, prenant en compte l'accumulation lorsque l'épisode dure plusieurs jours.

Néanmoins, l'IRSN a noté certains records complémentaires répertoriés dans l'étude Météo-France de 1993 [34] ou sur le site Info-climat. Dans la carte présentée en partie 2.2.3.3 du corps de texte, quelques records supplémentaires ont été ajoutés issus des données répertoriées dans cette étude.

Tableau 33. Records de neige complémentaires issus de l'étude Météo-France de 1993 [34]

Localisation	Latitude	Longitude	Mesure (cm)	Date
Biscarosse	44° 23' 39" N	1° 09' 46" O	56	1956
Lège-Cap-Ferret	44° 47' 42" N	1° 08' 48" O	80	1956
Cap-de-la-Hague	49° 42' 46" N	1° 55' 15" O	30	1958
Cazaux	43° 03' 09" N	1° 30' 35" E	40	1956
Châteaudun	48° 04' 59" N	1° 19' 59" O	30	1986
Dunkerque	51° 02' 18" N	2° 22' 39" E	23	1970
Evreux	49° 01' 37" N	1° 09' 05" E	24	1969
Le Bourget	48° 56' 07" N	2° 25' 32" E	40	1946
Mont-de-Marsan	43° 53' 29" N	0° 29' 58" O	20	1979
Trappes	48° 46' 39" N	2° 00' 09" E	55	1946

Dans le cadre du stage mené à l'été 2020 à l'IRSN, des données issues du site info-climat⁸⁴ ont été récoltées. La plupart correspondent aux valeurs MF mais quelques valeurs notables ont été recensées (peu d'information sur les sources) et ajoutés sur la carte en partie 2.2.3.3 du corps de texte.

Tableau 34. Records de neige complémentaires issus du site info-climat

Localisation	Latitude	Longitude	Mesure (cm)	Date
Lège-Cap-Ferret	44° 47' 42" N	1° 08' 48" O	80	31/01-29/02/1956
Montcuit	49° 07' 14" N	1° 20' 29" O	70	25/11-05/12/2010
Privas	44° 44' 09" N	4° 36' 00" E	80	23/12/1970-15/01/1971
Montcuit	49° 07' 14" N	1° 20' 29" O	70	25/11-05/12/2010
Bagnols-sur-Cèze	44° 09' 45" N	4° 37' 13" E	60	03-04/04/1974
Bricquebec	49° 28' 12" N	1° 37' 45" O	60	11-13/03/2013
Phalsbourg	48° 46' 07" N	7° 15' 33" E	60	07/02/1958
Cap-Béar	42° 30' 56" N	3° 08' 12" E	60	22-23/01/1992
Saint-Tropez	43° 16' 24" N	6° 38' 23" E	60	31/01-29/02/1956
Trappes	48° 46' 39" N	2° 00' 09" E	55	01-09/03/1946
Nancy	48° 41' 37" N	6° 11' 05" E	51	19-20/02/1969
Aubenas	44° 37' 14" N	4° 23' 28" E	50	02-13/11/1980

⁸⁴ <https://www.infoclimat.fr/>

Annexe 7. Exigence de comportement des structures de génie civil définies par les exploitants

Cette annexe complète la partie 3.1 du corps de texte du rapport concernant les exigences de comportement des structures. Celles-ci sont définies par chaque exploitant en fonction des activités qu'il conduit dans ses structures. Les éléments transmis par les exploitants sont synthétisés dans le corps de texte et tracé in extenso ci-après.

7.1. Exigences définies dans le référentiel du CEA

1) Résistance

a) Exigence de stabilité d'ensemble (SE)

Cette exigence est nécessaire et préalable à l'attribution de toute autre exigence de comportement à une structure. Elle a pour objectif le non-effondrement de la structure. Elle est attribuée au système principal de contreventement dont le comportement peut être non linéaire. La perte d'éléments structuraux est par conséquent admise lorsque leur effondrement n'entraîne pas la défaillance généralisée de la structure.

b) Exigence de non interaction (NI)

Cette exigence porte sur la capacité d'un ouvrage proche d'un matériel ou d'un bâtiment affecté d'exigences particulières de sûreté, de ne pas créer d'interaction à caractère préjudiciable en termes de sûreté envers le matériel ou le bâtiment à protéger (distance suffisante et stabilité d'ensemble par absence d'effondrement).

c) Exigence de stabilité locale (SL)

Cette exigence est similaire à l'exigence de stabilité d'ensemble mais elle porte cette fois sur un élément structural et vise à se prémunir de l'effondrement de ce dernier.

d) Exigence de supportage (SP)

Cette exigence s'applique aux zones structurelles supportant des matériels pour lesquels une exigence de stabilité est requise. Elle implique une exigence de stabilité d'ensemble pour la structure et une exigence de stabilité locale pour les éléments supportant les matériels. Le comportement des zones de supportage doit permettre aux dispositifs d'ancrage des matériels de fonctionner en conservant des résistances adéquates. Dans le cas d'un ouvrage en béton, cette exigence revient à limiter la fissuration des zones de supportage et à choisir des dispositifs d'ancrage adaptés à cette fissuration.

2) Exigences de comportement local de parois soumises à des impacts

a) Exigence de non perforation

La perforation d'une paroi de génie civil soumise à l'impact d'un projectile, désigne le phénomène local de traversée complète de cette paroi par le projectile qui peut alors continuer sa course à l'intérieur de l'installation, accompagné d'autres projectiles secondaires résultant de l'endommagement de la paroi (bouchon de béton, débris associés, matériels, etc.). L'exigence de non perforation vise à empêcher la traversée de la paroi par le projectile.

b) Exigence de non écaillage

L'ébranlement d'une paroi consécutif à un choc peut conduire à l'éjection de projectiles situés sur sa face non soumise à l'impact (morceaux de matériaux, matériels fixés sur la paroi). L'exigence de non écaillage vise à se prémunir de ce phénomène.

3) Étanchéité

a) Exigence de participation au confinement standard

Cette exigence correspond à l'exigence classique de « clos et couvert » des bâtiments courants.

b) Exigence de participation au confinement améliorée

Cette exigence porte sur la capacité des parois à limiter à des cinétiques très lentes les transferts de poudre en suspension, de gaz ou de liquides à faible pression (étanchéité comparable à celle d'une porte étanche à faible pression). L'ouverture et l'espacement des lignes de fuite potentielle (fissures, joints entre éléments, etc.) sont contrôlés et limités. Les armatures de béton armé et les aciers de construction métallique restent dans le domaine élastique, ce qui permet d'un point de vue statistique d'assurer après une agression, une capacité de retour des parois de confinement vers un état voisin proche de leur état initial (refermeture des fissures dans des parois en béton, quasi-retour à la géométrie initiale des structures en charpente métallique).

c) Exigence de participation au confinement optimisée (PCO et PCOR)

Cette exigence porte sur capacité des parois à prévenir toute dissémination de liquides, de gaz ou de poudres en suspension (association à une limitation du débit de fuite sous pression de confinement après une agression). Le confinement ne peut pas en règle générale être assuré par le génie civil seul et il est nécessaire de lui associer d'autres technologies (précontrainte, liner, revêtement, ventilation, cascades de parois ou d'enveloppes) pour satisfaire à l'exigence de confinement. Cette exigence est graduée par des niveaux de performance croissants, associés à des critères de justification spécifiques de sévérité croissante : exigences PCO sans revêtement ou liner, et PCOR dans le cas contraire.

4) Autres exigences spécifiques à des situations autres que le vent ou la neige

a) Exigence d'occupation immédiate

Dans la démonstration de la sûreté de l'installation, il peut être prévu après une agression que certaines actions humaines puissent être réalisées dans un certain délai (exemple : arrêt manuel d'une ventilation, fermeture d'une vanne, etc.). Pour cela, il est nécessaire que les locaux où doivent être réalisées ces actions, soient accessibles et utilisables malgré les conséquences de l'agression. Elle se décline en exigences de comportement attribuées à la fois à la structure (SE) et à certains de ses éléments structuraux (SL) ainsi qu'aux matériels qu'elle supporte dont la perte de stabilité ou l'interaction avec des éléments structuraux ou d'autres matériels, pourraient à la fois empêcher l'accès aux locaux concernés et les actions humaines à accomplir.

b) Exigences relatives à la maîtrise des risques liés à l'incendie :

- Performance matériaux vis-à-vis de la réaction au feu, de la limitation des départs de feu, du développement d'un incendie, de sa propagation et de ses effets ;
- Exigence (ou fonction) séparative vis-à-vis de la résistance au feu qui se traduit principalement par les exigences (ou fonctions) suivantes : étanchéité aux flammes et aux gaz chauds et isolation thermique.

c) Exigence de non débordement d'une piscine

Cette exigence vise à s'assurer que la hauteur du franc-bord est suffisante pour empêcher le débordement de la piscine lorsque, en situation sismique ou dans le cas d'un ébranlement dû à un choc, des vagues se forment à la surface de l'eau.

d) Exigence de limitation des dimensions géométriques

Cette exigence vise à s'assurer que les dimensions géométriques d'une partie d'une installation restent dans des limites permettant de contrôler le risque de criticité. Cette exigence définit une limitation des déformations ou des déplacements.

7.2. Exigences définies dans le référentiel ORANO

Les exigences définies dans le référentiel ORANO peuvent être regroupées comme :

- exigences relatives à la résistance mécanique,
- exigences relatives à l'absence d'agression,
- exigences relatives à la limitation des dommages,
- exigences d'étanchéité pour le confinement des substances radioactives,
- exigence de durabilité,
- exigences liées aux rayonnements ionisants,
- exigence de conservation de la géométrie.

1) Résistance, agression et dommages

a) Exigence de stabilité d'ensemble (SE)

Cette exigence a pour objet d'assurer le non-effondrement de la structure, de l'ouvrage dans son ensemble ainsi que l'absence de glissement et de renversement. Des endommagements localisés sont acceptés.

b) Exigence de stabilité structurelle (SS)

Cette exigence a pour objet d'assurer le non-effondrement de l'ensemble des éléments structuraux (comportement élément par élément).

c) Exigence de supportage (SU)

Cette exigence définit la capacité des structures du génie civil à supporter des éléments dits non structuraux (tuyauteries, équipements mécaniques...).

d) exigence de non agression (NA)

e) Exigence de limitation des dommages (LD)

Cette exigence globale sur le comportement de l'ouvrage vise à s'assurer que le niveau de déformation de la structure est compatible avec les exigences attribuées aux éléments structuraux.

2) Etanchéité

Il existe plusieurs niveaux d'exigence d'étanchéité, en fonction notamment des matières dont on veut prévenir le rejet.

a) Exigence de « clos et couvert » (CC)

Cette exigence assure la protection des équipements à l'égard des intempéries et permettre le fonctionnement du système de ventilation (cascades de dépression).

b) Exigence de rétention (RE)

Cette exigence consiste à limiter, pour des cinétiques très lentes, les transferts de liquides.

c) Exigences de confinement (PC1, PC2, PC3)

Ces exigences, de niveaux croissants, permettent de prévenir la dissémination, à travers une paroi, de gaz ou de poudres en suspension, en raison des différences de pression (générées par la ventilation du bâtiment ou le vent extérieur) pour les exigences PC1 et PC2, ou de la pression élevée des gaz pour l'exigence PC3.

3) Durabilité (D)

L'exigence de durabilité a pour objet de protéger chaque élément structural des agressions de l'environnement (air marin, produits chimiques, agressivité des eaux...), de sorte que sa détérioration, pendant la durée d'utilisation de l'installation, permettent d'assurer les fonctions requises.

4) Autres exigences spécifiques à des situations autres que le vent ou la neige - Exigences liées aux rayonnements ionisants

a) Exigence de radioprotection (IR)

Cette exigence a pour objet d'assurer, dans le cas de zones fortement irradiées, la résistance à l'irradiation des structures.

b) Exigence de conservation de la géométrie (CG)

Cette exigence a pour objet de garantir l'absence d'accident de criticité dans l'installation par la maîtrise des déformations et des déplacements au sein de la structure.

7.3. Exigences définies dans le référentiel EDF

Ces exigences de comportement des ouvrages de Génie Civil sont extraites du RCC-CW [59] et sont applicables à la conception.

L'ANNEXE D (informative) du RCC-CW donne un exemple des exigences pour chacune des structures de l'Îlot Nucléaire, selon les définitions suivantes.

1) Résistance

a) Exigence de stabilité (S)

Les structures concernées ne doivent pas s'effondrer.

Dans le cadre du RCC-CW, cette exigence est atteinte de la manière suivante :

- pour le DBD (Domaine du Design Basis), vérifications à l'ELU.f⁸⁵ (EQU/STR/GEO/UPL) et à l'ELU.a⁸⁶ conformément aux Eurocodes et aux exigences spécifiques complémentaires spécifiées dans ce code ;
 - pour le DED (Domaine du Design Extension), vérifications spécifiques complétées par des approches adaptées associées aux critères définis dans des sections spécifiques du RCC-CW.
- b) Exigence de supportage (R)

Cette exigence inclut la résistance mécanique et un supportage satisfaisant des équipements.

Dans le cadre du RCC-CW, cette exigence est atteinte de la manière suivante :

- pour le DBD, différentes spécifications de méthodes ou critères d'analyse tels que : analyse linéaire, prescription pour limiter la fissuration dans les structures en béton, limitation des déformations des matériaux pour les combinaisons ELU.f et ELU.a, etc. ;
- pour le DED, la fonction de supportage doit être contrôlée au moyen de vérifications spécifiques complétées par des méthodes adaptées.

⁸⁵ ELU.f : Etats Limites Ultimes fondamentaux (situations de référence durables et transitoires)

- EQU : Etats limites d'équilibre statique
- GEO : Etats limites ultimes associés à la défaillance ou à la déformation excessive du sol lorsque les résistances du sol ou de la roche sont significatives pour la résistance
- STR : Etats limites associés à une défaillance interne ou à la déformation excessive des éléments structuraux lorsque la résistance des matériaux de construction de la structure domine
- UPL : Etats limites associés à un soulèvement global de la structure ou du sol causé par une pression d'eau (flottabilité) ou d'autres actions verticales

⁸⁶ ELU.a : Etats Limites Ultimes accidentelles (situations accidentelles)

L'ensemble de ces méthodes et critères est décrit dans les chapitres spécifiques du RCC-CW⁸⁷.

2) Étanchéité

a) Exigence d'étanchéité aux liquides (L)

Les structures concernées doivent retenir les liquides.

Pour le DBD, l'étanchéité est généralement obtenue par le respect des critères d'Etats limites de service particuliers décrits dans les sections spécifiques du RCC-CW 2015.

L'étanchéité des structures de génie civil contenant des liquides radioactifs peut être obtenue par la pose de revêtements. Pour les revêtements métalliques, les critères spécifiques sont définis dans les sections spécifiques du RCC-CW 2015. Toute autre solution équivalente doit être soumise à l'approbation du Projet.

Pour le DED, l'étanchéité doit être contrôlée par des vérifications spécifiques associées à des méthodes adaptées et cohérentes définies dans des sections spécifiques du RCC-CW 2015.

b) Exigence de confinement des gaz (C)

Les structures concernées doivent assurer le confinement des gaz sous pression avec un taux de fuite limité.

Dans le cadre du RCC-CW, cette exigence est atteinte par l'application de limites sur les déformations réversibles ou irréversibles autorisées dans le matériau afin de limiter le niveau de fissuration du béton, par la marge de résistance des câbles de précontrainte et des armatures du béton, ainsi que par la capacité de déformation de l'acier du revêtement métallique d'étanchéité. Cette exigence conduit à des critères spécifiques décrits dans des sections spécifiques du RCC-CW 2015 pour chaque matériau.

Pour le confinement du Bâtiment Réacteur, les critères définis pour le DED s'appuient sur l'IAEA-NS-G-1.10 [104]. D'autres méthodes sont admissibles si les critères associés concernant le taux de fuite garantissent des niveaux acceptables pour les exigences de sûreté. Ces méthodes doivent être soumises à l'approbation du Projet.

3) Durabilité (D) :

Les structures concernées doivent être durables.

Lorsque la fatigue menace de réduire la durabilité des structures, celle-ci est prise en compte conformément aux Eurocodes (EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993 et EN 1997).

La durabilité ne nécessite pas de vérification supplémentaire au DED.

4) Service (F) :

Les structures concernées doivent être compatibles avec les exigences des équipements utilisés en exploitation normale, pendant et après des situations exceptionnelles, sans aucune réparation.

Les déformations des structures et matériaux sont limitées pour les situations de charge normales et exceptionnelles : pour les conditions de fonctionnement du Design Basis, cette exigence conduit aux critères ELS (Etat Limite de Service) des sections spécifiques du RCC-CW 2015.

Le critère de service ne nécessite pas de vérification supplémentaire au DED.

⁸⁷ Les exigences générales de conception sont décrites dans 6 sections : Règles générales pour le domaine géotechnique (DGEO), Règles générales pour les structures en béton (DCONC), Parties métalliques participant à l'étanchéité de l'enceinte de confinement (DCLIN), Parties métalliques participant à l'étanchéité des piscines et réservoirs (DPLIN), Règles générales pour les structures en acier (DSTLW), Exigences aux interfaces entre ancrages et béton (DANCH)

7.4. Exigences définies dans le référentiel Framatome

Les différentes exigences de comportement qui peuvent être attribués aux ouvrages de génie civil de FRAMATOME sont présentées ci-après.

1) Résistance

a) Exigence de Stabilité d'ensemble (SE)

Il s'agit d'assurer le non-effondrement et le non-renversement de l'ouvrage. Elle porte sur les éléments primaires, c'est-à-dire ceux assurant le contreventement de l'ouvrage.

b) Exigence de Non interaction (NI)

Il s'agit d'assurer l'absence d'interaction préjudiciable de l'ouvrage considéré vers une ou plusieurs structures voisines.

c) Exigence de Stabilité locale (SL)

Il s'agit d'assurer le non-effondrement et le non-renversement des éléments secondaires (c'est-à-dire les éléments n'assurant pas le contreventement de l'ouvrage, comme certains murs en maçonnerie ou des cloisons légères par exemple).

2) Exigence d'étanchéité (E)

Il s'agit d'assurer la capacité d'un ouvrage à retenir les liquides. Cette exigence est réalisée par la mise en œuvre de dispositifs spécifiques d'étanchéité (cuvelage, résine ...) dans les rétentions.

Annexe 8. Combinaisons d'actions retenues par les exploitants pour l'étude des états limites ultimes (ELU)

Cette annexe complète la partie 3.3.1 du corps de texte du rapport concernant les pratiques des exploitants concernant les combinaisons d'actions accidentelles retenues pour le vent et le neige. Les éléments transmis par les exploitants sont synthétisés dans le corps de texte du rapport et tracé in extenso ci-après (sans mise en forme).

8.1. Combinaisons d'actions définies par le CEA

Les combinaisons d'actions accidentelles prises en compte par le CEA pour les nouvelles installations sont celles qui sont définies dans le paragraphe 6.4.3.3 de la norme NF EN 1990 (Eurocode 0). Ces combinaisons sont rappelées ci-après :

$$G_{max} + G_{min} + P + A_d + \sum \psi_{2j} Q_{kj}$$

Les différentes actions considérées dans ces combinaisons sont :

- G_{max} : action permanente défavorable,
- G_{min} : action permanente favorable,
- P : action de la précontrainte,
- A_d : action accidentelle,
- Q_{kj} : action variable,
- ψ_{2j} : coefficient permettant de définir la valeur quasi-permanente de l'action Q_{kj} .

La norme NF EN 1990 définit les valeurs fréquentes et quasi-permanentes d'une action et précise qu'elles peuvent être obtenues en multipliant respectivement par les coefficients ψ_1 et ψ_2 sa valeur caractéristique.

A titre d'exemple, les coefficients ψ_1 et ψ_2 fixés par la norme NF EN 1990 et son annexe nationale pour les actions climatiques sont rappelés dans le tableau suivant :

Actions variables	Valeurs de ψ_1	Valeurs de ψ_2
Neige (Altitude \geq 1000 m)	0,2	0
Vent	0,2	0
Variations thermiques (Hors incendie)	0,5	0

Les valeurs des coefficients ψ_2 prises en compte par le CEA sont définies dans le tableau suivant :

Actions variables	Valeurs de ψ_2	Commentaires
Charges d'exploitation	$0 \leq \psi_2 \leq 1$	La valeur maximale de ψ_2 dépend de la nature des charges. Elle peut varier au sein d'un même ouvrage.
Neige	$0 \leq \psi_2 \leq 0,2$	Pour ces actions, les valeurs des coefficients ψ_2 définies dans la norme NF EN 1990 sont nulles. Les valeurs maximales retenues par le CEA sont celles des coefficients ψ_1 définissant les valeurs fréquentes des actions.
Vent	$0 \leq \psi_2 \leq 0,2$	
Variations thermiques	$0 \leq \psi_2 \leq 0,5$	

Dans les combinaisons d'actions, le coefficient ψ_2 d'une action est pris égal à zéro lorsque ses effets sont favorables et à sa valeur lorsque ses effets sont défavorables.

Pour la neige et le vent, une étude statistique a été réalisée pour certains sites du CEA afin de déterminer leurs valeurs quasi-permanentes et les coefficients ψ_2 sont compris entre zéro et un (le coefficient ψ_2 étant pour mémoire le rapport entre les charges quasi-permanente et caractéristique). Lorsqu'aucune étude statistique n'a été effectuée, le coefficient ψ_2 est pris égal à 0,2.

Pour les charges d'exploitation, le coefficient ψ_2 est par exemple pris égal à zéro pour les charges d'entretien des toitures inaccessibles.

Pour la neige, le coefficient ψ_2 est pris égal à zéro lorsque les variations thermiques considérées sont celles de la saison chaude.

Les variations thermiques peuvent être négligées lors de l'étude de certaines structures et le coefficient ψ_2 est alors pris égal à zéro. Les variations de température quasi-permanentes sont généralement connues sur les centres du CEA et le coefficient ψ_2 y est inférieur à 0,5.

8.2. Combinaisons d'actions définies par ORANO

Généralités

Les combinaisons d'actions sont définies en cohérence avec le référentiel technique constitué par les références citées dans le standard interne ORANO concernant les règles de conception, de dimensionnement et de vérification du génie civil (Eurocodes notamment) [40].

Les combinaisons d'actions sont définies pour satisfaire les exigences de sûreté. Des combinaisons d'actions particulières peuvent être définies au cas par cas, en complément des combinaisons réglementaires, en cohérence avec l'analyse de sûreté de l'ouvrage considéré.

Notations :

$G_{k,max}$: valeur caractéristique maximale d'une action permanente défavorable

$G_{k,min}$: valeur caractéristique minimale d'une action permanente favorable

$Q_{k,L}$: charges d'exploitation

$Q_{k,T}$: actions dues aux variations de température (ext: externe)

$Q_{k,S}$: actions de la neige

$Q_{k,W}$: actions du vent

$A_{db,W}$: actions dues à un vent accidentel et des projectiles associés

$A_{db,S}$: actions dues à des précipitations de neige de niveau accidentel

γ_{th} : coefficient au comportement thermique

Combinaisons d'actions pour les situations durables et transitoires

Pour la conception ou la réévaluation des INB, et les actions variables climatiques (neige, vent et température) caractéristiques, deux cas sont distingués :

☐☐ En l'absence d'étude statistique spécifique des données de site : la valeur caractéristique réglementaire est appliquée, avec les coefficients de combinaisons usuels.

Par exemple, l'état limite ultime, en situations durables et transitoires, pour le vent est donné par

$$1,35 \times G_{k,max} + G_{k,min} + 1,05 \times Q_{k,L} + 0,9 \times \gamma_{th} \times (Q_{k,T}) + 0,75 \times Q_{k,S} + 1,5 \times Q_{k,W}$$

☐☐ Lorsqu'une étude statistique des données de site est utilisée : les valeurs de calcul définies dans un document ORANO propre au site (guide aléas) sont appliquées. Les actions variables de calcul $Q_{d,x}$ sont prises égales à 1,05

fois l'action caractéristique $Q_{k,x}$, déterminée par traitement statistique des données (valeur cinquantiennale, calculée suivant la théorie des valeurs extrêmes). Ce coefficient résulte du produit d'un coefficient partiel de l'action proprement dite, $\gamma_q = 1$ (les écarts défavorables étant pris en compte dans le traitement statistique), par un coefficient partiel pour le calcul des effets, $\gamma_{Ed} = 1,05$, tenant compte des incertitudes de la modélisation.

Par exemple, l'état limite ultime, en situations durables et transitoires, pour le vent est donné par

$$1,35 \times G_{k,max} + G_{k,min} + 1,05 \times Q_{k,L} + 0,9 \times \gamma_{th} \times Q_{k,T} + 0,525 \times Q_{k,S} + 1,05 \times Q_{k,W}$$

Les coefficients sont récapitulés dans le tableau suivant.

Actions	Permanententes		Variables			
	$G_{k,max}$	$G_{k,min}$	$Q_{k,L}$	$Q_{k,T}$	$Q_{k,S}$	$Q_{k,W}$
Situations caractéristiques						
Vent	1,0	1,0	0,7	0,6 γ_{TH}	0,5	1,0
Neige	1,0	1,0	0,7	0,6 γ_{TH}	1,0	0,6
Situations fréquentes – Equilibre statique						
Vent	1,1	0,9	1,35	0,9 γ_{TH}	0,75 (*) 0,525 (**)	1,5 (*) 1,05 (**)
Neige	1,1	0,9	1,35	0,9 γ_{TH}	1,5 (*) 1,05 (**)	0,9 (*) 0,63 (**)
Situations fréquentes						
Vent	1,35	1,0	1,05	0,9 γ_{TH}	0,75 (*) 0,525 (**)	1,5 (*) 1,05 (**)
Neige	1,35	1,0	1,05	0,9 γ_{TH}	1,5 (*) 1,05 (**)	0,9 (*) 0,63 (**)

Etats-limites de service

(*) : pas d'application d'une étude statistique propre au site

(**) : dans le cas d'une étude statistique propre au site

Combinaisons accidentelles

Chaque action accidentelle (A), au sens des Eurocodes, est à combiner avec les actions permanentes (G) et actions variables (Q), pondérées par les coefficients Ψ , caractérisant les actions d'accompagnement.

Pour la conception ou la réévaluation des INB, les valeurs des actions d'accompagnement climatiques (neige, vent et température) sont prises égales aux valeurs quasi-permanentes. Deux cas sont distingués :

☐☐ En l'absence d'étude statistique spécifique des données de site : la valeur quasi-permanente est définie en appliquant le coefficient ψ à la valeur caractéristique.

☐☐ Lorsqu'une étude statistique des données de site est utilisée : les valeurs $Q_{qp,x}$ définies dans un document ORANO propre au site (guide aléas) sont appliquées ; par exemple pour le vent, la valeur de vitesse de pointe médiane est retenue.

Par analogie avec l'approche retenue pour l'action variable de calcul $Q_{d,x}$, l'action accidentelle de calcul $A_{db,x}$ est quant à elle prise égale à l'action accidentelle caractéristique ($A_{k,x}$: période de retour centennale déterminée par

la théorie des valeurs extrêmes), pondérée par le produit des facteurs $\gamma_q \times \gamma_{Ed} = 1 \times 1,05$ pour les réexamens périodiques. Une pénalisation forfaitaire supplémentaire est appliquée pour les ouvrages neufs.

Les coefficients sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Actions	Permanentes		Variables				Accidentelles
	$G_{k,max}$	$G_{k,min}$	$Q_{k,L}$	$Q_{k,T}$	$Q_{k,S}$	$Q_{k,W}$	A
Vent	1,0	1,0	0,5	$0,2 \gamma_{th} (*)$ $\gamma_{th} Q_{qp,T} (**)$	$0,2 (*)$ $Q_{qp,S} (**)$	-	$A_{db,W}$
Neige	1,0	1,0	0,5	$0,2 \gamma_{th} (*)$ $\gamma_{th} Q_{qp,T} (**)$	-	$0,2 (*)$ $Q_{qp,W} (**)$	$A_{db,S}$

Actions d'accompagnement en situation accidentelle – Coefficients Ψ :

(*) : pas d'application d'une étude statistique propre au site

(**) : dans le cas d'une étude statistique propre au site

Les actions accidentelles ne sont pas combinées entre elles.

8.3. Combinaisons d'actions retenues par EDF

Le RCC-CW précise pour les deux domaines de conception : domaine de conception de référence (DBD : Domaine du Design Basis) et domaine de conception étendu (DED : Domaine du Design Extension)) :

- la définition des actions à considérer (sans prescrire la valeur de l'aléa qui est une donnée projet) ;
- les combinaisons d'actions à considérer.

Sauf spécification dans le Rapport de Sûreté ou un document équivalent, la caractérisation des actions climatiques est conforme à la méthodologie donnée par les Eurocodes (EN 1991-1-3 pour la neige et EN 1991-1-4 pour le vent).

Les combinaisons d'actions, présentées dans le paragraphe DGENR 3400 du RCC-CW, sont définies selon les principes généraux des Eurocodes. Ces combinaisons d'actions peuvent être adaptées par le projet afin de les mettre en cohérence avec le référentiel de sûreté.

Combinaisons :

Conditions de fonctionnement du Design Basis :

- Situation d'exploitation normale⁸⁸ :

Nota complémentaire d'EDF sur la codification des combinaisons :

1^{er} position → 2 : Conditions normales d'exploitation

2^{ème} position →

⁸⁸ EQU : Etats limites d'équilibre statique

ELU.f : Etats Limites Ultimes fondamentaux (situations de référence durables et transitoires)

ELS.c : Etats Limites de Service Caractéristiques

ELS.f : Etats Limites de Service fréquents

ELSqp : Etats Limites de Service Quasi permanents

ELU.a : Etats Limites Ultimes Accidentelles

a : pour état limite EQU

b : pour état limite ELU.f

c : pour état limite ELS.c

d : pour état limite ELS.f

e : pour état limite ELS.qp

3^{ème} position →

L : si l'action variable d'exploitation est l'action dominante

t : si l'action variable thermique est l'action dominante

w : si l'action variable du vent est l'action dominante

s : si l'action variable de la neige est l'action variable dominante

wl : si l'action de la nappe phréatique est l'action variable dominante

Les actions permanentes sont désignées par la lettre G ou P :

G comprend les actions permanentes :

- Le poids propres des éléments de structures*
- Le poids propres des équipements fixes*
- La pression hydrostatique du fluide*
- Les actions permanentes dues aux pressions latérales du sol*
- Les actions dues au niveau permanent de la nappe phréatiques (Gk,wl)*
- Les actions thermiques (Gk,T)*
- Les effets de distorsions imposées à la structure*
- La réaction de sol permanente*

P désigne l'action permanente due à la précontrainte

Les actions variables sont désignées par la lettre Q

Les charges d'exploitation (Qk, L)

Les actions dues aux variations de température causées par les conditions climatiques d'exploitations (Qk, T)

Les actions dues aux variations de la température de l'eau (Qk, T, N) et (Qk, T, E)

Les pressions dues aux fluides dans les structures

Les effets dus aux variations du niveau de nappe phréatique (Qk, wl)

L'action du vent (Qk,w) ou l'action de la neige (Qk,s)

Les actions induites par un séisme (Qk,E)

L'action variable représentant les essais du ponts (Qk, test) ou pression d'essai du BR

Conditions de fonctionnement du Design Basis			ACTIONS PERMANENTES			ACTIONS VARIABLES (Situations de référence durables)									ACTIONS VARIABLES (Situations de référence transitoires)			ACTIONS ACCIDENTELLES	
N°	Nom	Etat limite	G _{k,sup} (a)	G _{k,inf} (a)	P (a)	Q _{k,c} (b)	Q _{k,L} (c) (3)	Q _{k,T} (d)	Q _{k,T,N} (e)	Q _{k,w} (f)	Q _{k,s} (f)	Q _{k,w/EF} (g)	Q _{k,w/EF} (g)	Q _{k,w/EF} (g)	Q _{k,Test} (h)	Q _{k,T,E} (i)	Q _{k,E} (j)	Int (k)	Ext (k)
2aL	Situations d'exploitation normales	EQU	1,1	0,9	1,0	-	1,5	0,9	-	0,9	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2at (2)		EQU	1,1	0,9	1,0	-	1,05	1,5	-	0,9	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2aw		EQU	1,1	0,9	1,0	-	1,05	0,9	-	1,5	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2as		EQU	1,1	0,9	1,0	-	1,05	0,9	-	0,9	1,5	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2awl		EQU	1,1	0,9	1,0	-	1,05	0,9	-	0,9	0,75	-	-	1,2	-	-	-	-	-
2bL		ELU.f	1,35	1,0	1,0	-	1,5	0,9	-	0,9	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2bt (2)		ELU.f	1,35	1,0	1,0	-	1,05	1,5	-	0,9	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2bw		ELU.f	1,35	1,0	1,0	-	1,05	0,9	-	1,5	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2bs		ELU.f	1,35	1,0	1,0	-	1,05	0,9	-	0,9	1,5	1,2	-	-	-	-	-	-	-
2bwl		ELU.f	1,35	1,0	1,0	-	1,05	0,9	-	0,9	0,75	-	-	1,2	-	-	-	-	-
2cL		ELS.c	1,0	1,0	1,0	-	1,0	0,6	-	0,6	0,5	1,0	-	-	-	-	-	-	-
2ct (4)		ELS.c	1,0	1,0	1,0	-	0,7	1,0	-	0,6	0,5	1,0	-	-	-	-	-	-	-
2cw		ELS.c	1,0	1,0	1,0	-	0,7	0,6	-	1,0	0,5	1,0	-	-	-	-	-	-	-
2cs		ELS.c	1,0	1,0	1,0	-	0,7	0,6	-	0,6	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-
2cwl		ELS.c	1,0	1,0	1,0	-	0,7	0,6	-	0,6	0,5	-	-	1,0	-	-	-	-	-
2dL		ELS.f	1,0	1,0	1,0	-	0,5	-	-	0,2	0,2	1,0	-	-	-	-	-	-	-

Avec Q_{k,w} : action variable du vent

Q_{k,s} : action variable de la neige

- Situation accidentelle :

Conditions de fonctionnement du Design Basis			ACTIONS PERMANENTES			ACTIONS VARIABLES (Situations de référence durables)									ACTIONS VARIABLES (Situations de référence transitoires)			ACTIONS ACCIDENTELLES	
N°	Nom	Etat limite	G _{k,sup} (a)	G _{k,inf} (a)	P (a)	Q _{k,c} (b)	Q _{k,L} (c) (3)	Q _{k,T} (d)	Q _{k,T,N} (e)	Q _{k,w} (f)	Q _{k,s} (f)	Q _{k,w/EF} (g)	Q _{k,w/EF} (g)	Q _{k,w/EF} (g)	Q _{k,Test} (h)	Q _{k,T,E} (i)	Q _{k,E} (j)	Int (k)	Ext (k)
15	Vent accidentel	ELU.a	1,0	1,0	1,0	-	0,3 (1)	0,5	-	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	A _{ob,w}
16	Neige accidentelle	ELU.a	1,0	1,0	1,0	-	0,3 (1)	0,5	-	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	A _{ob,s}
20 (2)	DBE + conditions climatiques	ELU.a	1,0	1,0	1,0	-	0,3 (1)	0,5	-	0,2	0,2	-	-	1,0	-	-	-	-	A _{ob,E}

Domaine du Design Extension :

DEC ET DEH		ACTIONS PERMANENTES			ACTIONS VARIABLES (1)			ACTIONS ACCIDENTELLES		
N°	Nom	G _{k,sup}	G _{k,inf}	P	Q _{k,L}	Q _{k,w/EF}	Q _{k,T} (4)	Interne	Externe	
DEH	DE7	Neige	1,0	1,0	1,0	0,3 (5)	1,0 (2)	0,5	-	A _{ob,s}
DEH	DE8	Vent	1,0	1,0	1,0	0,3 (5)	1,0 (2)	0,5	-	A _{ob,w}

Annexe 9. Eléments généraux sur la théorie des valeurs extrêmes

9.1. Fondements théoriques

La théorie statistique des valeurs extrêmes s'appuie principalement sur deux théorèmes fondamentaux : le théorème de Fisher-Tipett [4][1] et le théorème de Pickands [33]. Ces deux résultats de probabilité, conduisent à deux méthodes de modélisation statistique des valeurs extrêmes : le premier théorème étudie le comportement asymptotique d'un échantillon de maxima (ou minima) ; le second étudie celui d'un échantillon d'excès au-dessus d'un seuil élevé.

Concrètement, le premier théorème stipule que la loi de probabilité du maximum d'une variable aléatoire indépendante et identiquement distribuée (iid), converge vers une famille de lois, dite famille des lois généralisées des valeurs extrêmes ou GEV (Generalized Extreme Values), sous des conditions standard, quand la taille du bloc sur lequel est pris le maximum tend vers l'infini [42]. De la même façon et sous des conditions analogues, la loi de probabilité d'un échantillon de valeurs supérieures à un seuil élevé u fixé (échantillon d'excès), converge vers une famille de lois appelées lois de Pareto généralisées, notées GPD (Generalized Pareto Distribution), quand le seuil u tend vers l'infini. En simplifiant le contenu de ces deux théorèmes on remarque l'analogie avec le théorème central limite, qui établit la convergence en loi des moyennes des échantillons de variables aléatoires vers la loi normale. On peut simplifier le premier théorème des valeurs extrêmes en disant qu'il établit la convergence en loi des maxima des échantillons de variables aléatoires vers la famille GEV.

9.2. Limites et précautions pour l'application aux variables hydrométéorologiques

La théorie des valeurs extrêmes fournit donc un cadre théorique rationnel pour l'estimation et l'analyse de données avec des résultats mathématiques précieux et utiles. Cependant, l'application de cette théorie aux variables hydrométéorologiques présente un certain nombre de difficultés qui vont mener à de nécessaires compromis.

Tout d'abord, la théorie est formulée pour des variables indépendantes et identiquement distribuées, ce qui n'est pas le cas des variables hydrométéorologiques puisque l'état d'un jour dépend au minima de celui de la veille, et elles présentent généralement un comportement saisonnier. La théorie a cependant été étendue au cas de variables faiblement dépendantes ou stationnaires. Une série X_1, \dots, X_N est dite stationnaire si pour tout ensemble d'entiers $\{i_1, \dots, i_k\}$ et pour tout entier h , la distribution de X_{i_1}, \dots, X_{i_k} est identique à celle de $X_{i_1+h}, \dots, X_{i_k+h}$. Il est en général possible de se ramener à la stationnarité, par exemple en se limitant à la saison à risque. Mais d'autres motifs de non stationnarité peuvent se présenter (variabilité interannuelle ou tendance par exemple), qu'il sera nécessaire d'étudier au cas par cas.

Par ailleurs, le théorème indique la loi vers laquelle converge asymptotiquement la loi du maximum centré normé, quand le nombre de valeurs sur lequel est pris ce maximum tend vers l'infini. *L'asymptotique probabiliste* consiste donc à approcher la loi du maximum pris sur un nombre donné de valeurs par une loi GEV. Elle porte sur le nombre d'observations prises en compte et non sur le nombre de maxima considérés. Il s'agit de l'approximation de la loi d'un maximum. En pratique, ce maximum est pris sur un grand nombre d'observations, certes important mais heuristiquement loin de l'infini, la qualité de cette heuristique étant liée à la vitesse de convergence de la loi du maximum centré normé vers la loi théorique. De la même façon, on choisira dans le cas de l'approche par dépassements de seuil, un seuil « suffisamment » élevé pour que la convergence vers la loi limite puisse être supposée atteinte. On devra donc faire une **approximation probabiliste**.

Ensuite, une fois un échantillon de valeurs dont on suppose que sa loi est la loi limite des théorèmes construit, il s'agit d'estimer les paramètres de la loi. Pour ce faire, il faut d'une part que les valeurs puissent être considérées comme indépendantes, et d'autre part, qu'elles soient en nombre suffisant pour que l'estimation des paramètres

ne soit pas trop incertaine. Il est donc nécessaire, dans le cas des maxima par blocs, de définir des tailles de blocs telles que les maxima puissent être considérés comme raisonnablement indépendants, et dans le cas des dépassements de seuil, de définir une stratégie pour les rendre indépendants. Ensuite, de la taille de l'échantillon ainsi constitué dépendra la robustesse de l'estimation des paramètres de la loi limite de la théorie. On fera donc une **approximation statistique**.

Enfin, dans le cas où la variable a une distribution continue les théorèmes s'appliquent bien. Ce n'est pas nécessairement le cas si la variable est discrète, et notamment, ils ne s'appliquent pas dans le cas où elle présente des ex-aequo, ce qui est le cas lorsque les observations sont arrondies.

L'application de la théorie statistique des valeurs extrêmes aux variables hydrométéorologiques nécessite donc des précautions pour vérifier au mieux les hypothèses d'application (stationnarité, taille de l'historique et nombre d'événements observés, absence d'ex-aequo) et rechercher un compromis acceptable entre approximation probabiliste et approximation statistique.

9.3. Estimation des valeurs extrêmes

L'application de la théorie statistique des valeurs extrêmes aux variables hydrométéorologiques nécessite donc des précautions pour vérifier au mieux les hypothèses d'application et rechercher un compromis acceptable entre approximation probabiliste et approximation statistique.

Une fois qu'on dispose d'une expression mathématique de la distribution des valeurs extrêmes de la variable considérée, on peut calculer des valeurs très rares, souvent exprimées en termes de niveaux de retour. Dans le cas des maxima par blocs, il correspond au quantile $1-p$ de la distribution GEV, avec $p=nb/T$ où nb est le nombre de blocs considéré chaque année et T la période de retour : $G_\xi(z_T) = 1 - \frac{nb}{T}$ ou de façon équivalente $P(M_N \geq z_T) = p$. Son expression mathématique est alors :

$$z_p = G_\xi^{-1}(1-p) = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - (-\log(1-p))^{-\xi} \right] & \text{si } \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log(-\log(1-p)) & \text{si } \xi = 0 \end{cases}$$

Dans le cas des dépassements de seuil, le niveau de retour correspond à la valeur dépassée en moyenne toutes les $m=T*k$ observations où k est le nombre de valeurs par an ($k = 365$ si l'échantillon considéré est au pas de temps journalier et si la variable est stationnaire sur l'année). La formule théorique est alors :

$$z_m = \begin{cases} u + \frac{\sigma}{\xi} \left[\{mP(X > u)\}^\xi - 1 \right] & \text{si } \xi \neq 0 \\ u + \sigma \log(mP(X > u)) & \text{si } \xi = 0 \end{cases}$$

La probabilité de dépassement du seuil $P(X>u)$ est notée ζ_u et est classiquement estimée par le rapport du nombre de dépassements du seuil u sur le nombre total de valeurs dans l'échantillon.

Enfin, en pratique, les paramètres des distributions d'extrêmes ne sont donc pas connus mais estimés à partir d'un échantillon et ce sont ces valeurs estimées qui entrent dans les formules pour estimer le niveau de retour. La première étape consiste à créer l'échantillon de valeurs élevées sur lequel sera effectué l'ajustement, en veillant à vérifier au mieux la stationnarité (par exemple en se limitant à la saison à risque), en éliminant les ex-aequo s'il en existe (par exemple par une technique dite de « jittérisation ») et en recherchant le meilleur compromis entre les approximations probabiliste et statistique. Différentes techniques existent ensuite pour estimer les paramètres d'une distribution à partir d'un échantillon. La plus utilisée est la méthode dite « du maximum de vraisemblance », consistant à rechercher les paramètres qui maximisent la probabilité pour que l'échantillon observé soit généré par la distribution d'extrêmes ajustée. En outre, il est nécessaire de contrôler

l'erreur d'estimation, au moins la part de cette erreur liée à l'échantillonnage, par le biais d'**intervalles de confiance**. Plusieurs techniques existent :

- la « delta-méthode », basée sur la normalité asymptotique des estimateurs du maximum de vraisemblance, qui donne des intervalles centrés sur la valeur estimée [42];
- la vraisemblance profilée, basée sur le théorème de la déviance, qui donne des intervalles non centrés [42];
- des méthodes de bootstrap paramétrique ou non paramétrique [43]. Le bootstrap est une méthode de ré-échantillonnage, qui consiste à créer un grand nombre d'échantillons comparables à l'échantillon observé et à faire les mêmes estimations sur chaque nouvel échantillon créé. On obtient ainsi une distribution de la quantité estimée (par exemple le niveau de retour), à partir de laquelle on déduit un intervalle de confiance (là aussi, plusieurs techniques sont proposées). Le bootstrap est dit paramétrique si la génération des échantillons est réalisée à partir de la distribution ajustée. On parle aussi de génération par simulation. Le ré-échantillonnage ou bootstrap non paramétrique consiste à générer les nouveaux échantillons à partir de tirages aléatoires avec remise dans l'échantillon de départ.

Annexe 10. Aspects théoriques associés à la simulation CFD

Cette annexe complète la partie 4.4.1 du corps de texte du rapport. La simulation CFD (pour Computational fluid dynamics) consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide.

10.1. Système des équations de Navier-Stokes

On se place dans le cas d'un écoulement de fluide incompressible dans un domaine spatial Ω et un intervalle de temps $[0, T]$. Le choix d'un écoulement incompressible ($\rho = \text{Cte}$) est fait par commodité. Une hypothèse supplémentaire est que la viscosité du fluide ne dépende pas de la température. Enfin, on se place dans le cas d'écoulements turbulents et le nombre de Reynolds de l'écoulement défini par :

$$\text{Re} = \frac{V L}{\nu}$$

est supposé grand. Les échelles de vitesse V et de longueur L sont représentatives de l'écoulement considéré. Dans ce cadre, le système des équations de Navier-Stokes, composé des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, s'écrit sous forme dimensionnelle :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \mathbf{v}_t + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} - \nu \Delta \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \mathbf{f} \end{cases} \text{ dans } \Omega \times [0, T]$$

Le terme \mathbf{f} désigne la force massique. Les inconnues du problème correspondent aux champs de vitesse et de pression respectivement notés \mathbf{v} et p .

On associe à la solution du système des conditions initiales du type :

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t = 0) = \mathbf{v}_0(\mathbf{x}) \text{ pour } \mathbf{x} \in \Omega$$

et des conditions aux limites comme une condition de vitesse uniforme à l'infini amont ou une condition d'adhérence sur la paroi d'un obstacle.

10.2. Echelles de turbulence

Une description qualitative d'un écoulement turbulent^{89,90,91} repose sur l'idée d'un écoulement instationnaire, fortement tridimensionnel avec la coexistence d'une multiplicité de tourbillons. Selon le principe de la cascade d'énergie, les tourbillons de plus grande taille sont porteurs d'énergie et entretiennent les tourbillons de plus petite taille. On notera l ; $v(l)$; $t(l)$ les échelles des tourbillons et on va maintenant expliquer le rôle joué par les tourbillons de différentes tailles.

En notant l_0 , v_0 , t_0 les échelles respectivement de longueur, de vitesse et de temps des plus grands tourbillons, leur taux de dissipation est estimé selon la relation :

$$\epsilon \approx \frac{v_0^3}{l_0}$$

Leurs échelles sont comparables à celles de l'écoulement précédemment utilisées pour définir le nombre de Reynolds de l'écoulement. Ces structures tourbillonnaires sont généralement anisotropes contrairement aux

⁸⁹ J. Cousteix, « Turbulence et couches limites », Cépaduès édition (1989).

⁹⁰ S. B. Pope, « Turbulent Flows », Cambridge University Press (2000).

⁹¹ J. O. Hinze, « Turbulence », McGraw-Hill Ed. (1959).

tourbillons de taille plus petite et elles contiennent une bonne part de l'énergie cinétique de la turbulence. Pope⁹⁰ indique que la taille de ces structures varie entre $l_{EI} = \frac{1}{6} l_o$ et $6 l_o$.

La question se pose alors de savoir jusqu'à quelle taille le transfert d'énergie entre tourbillons se produit. En fait, il existe une taille critique en-deçà de laquelle aucun tourbillon n'existe du fait de la dissipation visqueuse. Les échelles de longueur l_K , de vitesse v_K et de temps t_K associées à ces plus petits tourbillons correspondent aux échelles de Kolmogorov. Des arguments dimensionnels permettent de relier les échelles de Kolmogorov au taux de dissipation ϵ et à la viscosité cinématique du fluide ν . On a ainsi :

$$\begin{cases} l_K \approx \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4} \\ v_K \approx (\nu \epsilon)^{1/4} \\ t_K \approx \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2} \end{cases}$$

et le nombre de Reynolds associé à ces valeurs vérifie :

$$Re_K = \frac{v_K l_K}{\nu} = 1$$

En comparant les échelles des plus petits et des plus grands tourbillons, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{l_K}{l_o} \approx Re^{-3/4} \\ \frac{v_K}{v_o} \approx Re^{-1/4} \\ \frac{t_K}{t_o} \approx Re^{-1/2} \end{cases}$$

montrant une séparation entre les échelles d'autant plus importante que le nombre de Reynolds de l'écoulement est important. Une estimation de la taille des tourbillons en dessous de laquelle les effets dissipatifs sont prépondérants est $l_{DI} = 60 l_K$.

Pour les tourbillons compris dans la région intermédiaire entre l_{EI} et l_{DI} , le transfert d'énergie vers les plus petites structures est équilibré par le taux de dissipation des plus grosses structures. Les échelles de ces tourbillons peuvent s'exprimer par rapport aux échelles des petites ou des grandes structures selon les relations :

$$\begin{cases} v(l) = (\epsilon l)^{1/3} = v_K \left(\frac{l}{l_K}\right) \equiv v_o \left(\frac{l}{l_o}\right)^{1/3} \\ t(l) = \left(\frac{l^2}{\epsilon}\right)^{1/3} = t_K \left(\frac{l}{l_K}\right)^{2/3} \equiv t_o \left(\frac{l}{l_o}\right)^{2/3} \end{cases}$$

10.3. Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle est un outil puissant pour comparer des écoulements entre eux. Elle permet ainsi de reproduire en soufflerie sur un modèle d'avion à échelle réduite des phénomènes rencontrés en vol. Ce type d'analyse impose de vérifier à la fois la similitude géométrique (comparaison entre des objets de même forme) et la similitude dynamique⁹². C'est cette seconde similitude que l'on va brièvement décrire ici.

⁹² P. Huerre, «Mécanique des Fluides», Ecole Polytechnique (1996).

Reprenons l'exemple des équations de Navier-Stokes et plus précisément l'équation de conservation de la quantité de mouvement en supposant que l'écoulement est stationnaire. Cette équation s'écrit sous forme dimensionnelle :

$$\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} - \nu \Delta \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \mathbf{f}$$

En reprenant les échelles de vitesse V , de longueur L et en définissant les échelles de temps et de pression respectivement comme L/V et ρV^2 , on peut rendre cette équation sans dimension. Elle devient alors :

$$\tilde{\mathbf{v}} \cdot \tilde{\nabla}_{\tilde{\mathbf{x}}} \tilde{\mathbf{v}} - \frac{1}{\text{Re}} \tilde{\Delta} \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\nabla}_{\tilde{\mathbf{x}}} \tilde{p} = \tilde{\mathbf{f}}$$

Le signe tilde « \sim » indique que les variables dépendantes sont sans dimension (par exemple, $\tilde{v} = v/V$). Les dérivations en espace sont faites par rapport aux variables adimensionnées $\tilde{x} = x/L$ et $\tilde{t} = t V/L$. Dans cette équation, les variables dépendantes et leurs dérivées sont d'ordre 1. Le seul terme qui peut être d'un ordre différent est le terme visqueux qui est précédé par l'inverse du nombre de Reynolds. Si ce nombre est très élevé, cela signifie dans le cas d'un écoulement laminaire, que le terme visqueux est négligeable devant les autres et l'équation se met sous la forme simplifiée :

$$\tilde{\mathbf{v}} \cdot \tilde{\nabla}_{\tilde{\mathbf{x}}} \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\nabla}_{\tilde{\mathbf{x}}} \tilde{p} = \tilde{\mathbf{f}}$$

soit l'équation de conservation de la quantité de mouvement dans le système des équations d'Euler (modèle du fluide parfait). Un deuxième cas d'étude correspond à un écoulement bidimensionnel se développant sur une paroi. Une couche limite se développe et l'analyse dimensionnelle amène à définir une échelle de longueur L liée à la dimension de l'obstacle et une échelle de longueur liée à l'épaisseur de couche limite δ . En ne prenant pas en compte le terme de force volumique, l'introduction de ces deux échelles dans l'analyse dimensionnelle des équations de Navier-Stokes conduit aux équations de Prandtl de couche limite qui s'écrivent sous forme adimensionnée :

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} \\ 0 = \frac{\partial p}{\partial y} \end{cases}$$

Annexe 11. Etude EDF à l'échelle d'un site nucléaire en considérant l'objectif de caractérisation des effets des vents forts

Une étude de la configuration locale du bâti a été conduite sur un site EDF et a fait l'objet d'une publication lors du congrès ICONÉ 28 en 2020 [77]. Les étapes de ce type d'études sont les suivantes :

Tout d'abord un maillage du site d'intérêt doit être réalisé et doit comporter l'ensemble du relief et des structures pouvant avoir une influence sur les écoulements de vent. Le domaine d'étude doit être significativement plus grand que les installations d'intérêt pour ne pas avoir d'influence aux limites. La longueur de rugosité est prise en compte au sol et sur les parois des bâtiments. La taille des mailles aux abords des bâtiments est de l'ordre du mètre.

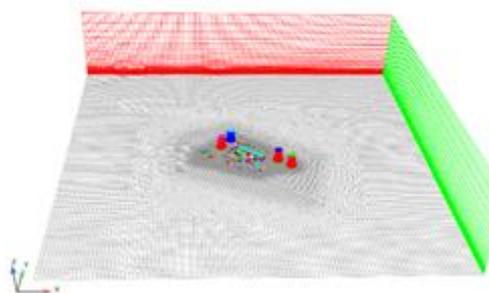


Figure 52 : Domaine de simulation de l'étude pour le site maillé au centre (4,5 x 4,5 x 1 km)

Le maillage doit être fortement raffiné près des installations d'intérêt, et peut être plus large aux abords du domaine d'étude. Dans le cas de l'étude, les tailles de cellules variaient de 1m près du sol à quelques centaines de mètres au plus haut du domaine. L'ensemble des bâtiments était inclus dans le maillage.

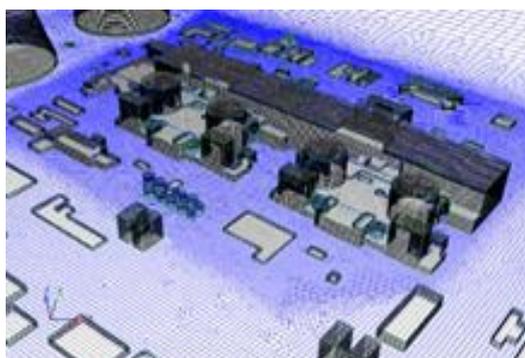


Figure 53 : Résolution horizontale du maillage à proximité des bâtiments

En raison de la grande taille du domaine, cette étape est lourde à conduire, particulièrement pour les sites avec de nombreux bâtiments dans la zone d'intérêt.

Des points d'extraction des résultats sont ensuite définis sur le domaine :

- à différents endroits autour de la zone d'intérêt afin de vérifier la bonne convergence des calculs,
- aux points d'intérêt éventuels identifiés en amont de l'étude.

Les profils fournis en entrée (vitesse de vent, température, énergie cinétique turbulente ...) sont définis sur toute la hauteur du domaine. Le profil logarithmique de la vitesse de vent est construit à partir d'une vitesse de référence à une hauteur de référence (variable selon les sites), et suit l'équation :

$$u(z) = \frac{u^*(z)}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right)$$

Les conditions aux limites du modèle sont ensuite déterminées en grande partie à partir de ces profils, et du choix de la longueur de rugosité affectée aux différentes zones du domaine.

Comme pour le recalage climatique, les simulations se font direction de vent par direction. Les directions retenues sont généralement issues de la rose des vents du site et correspondent aux vents dominants pour les phénomènes extrêmes.

La simulation résout les équations 3D RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) et fait appel à un modèle de turbulence standard k-ε. Les vitesses moyennes sont calculées par la simulation numérique, les rafales pouvant être obtenues à partir de l'intensité turbulente via la formule :

$$\hat{u} = G\bar{u} = (1 + g * TI)\bar{u}$$

où G est le coefficient de rafale, qui est fonction de : TI : intensité turbulente moyenne. Elle est déduite des valeurs de l'énergie cinétique turbulente calculée pour chaque maille du maillage et de \bar{u} : la vitesse moyenne donnée par la simulation.

Les résultats de ce type d'étude sont totalement dépendants du relief local et de la présence de structures proches des bâtiments d'intérêt. Il s'agit donc de simulations qui sont spécifiques au site étudié, leurs résultats ne peuvent pas être généralisés à d'autres installations.

Ces études sont lourdes à mettre en place et ne sont pas destinées à être généralisées en pratique industrielle systématique. Néanmoins, elles peuvent apporter des éléments de réponse précieux pour des questionnements nécessitant la prise en compte fine d'effets locaux sur les vitesses de vent. Elles peuvent donc être exploitées pour des cas particuliers de manière ponctuelle.

Le modèle choisi est le modèle RANS qui se base sur la moyenne des équations de Navier Stokes, équations qui permettent de calculer la mécanique des fluides. De ce fait, cette moyenne entraîne un lissage des effets extrêmes. C'est un modèle qui est très utilisé dans le monde industriel mais non adapté a priori pour l'étude des effets sur les structures, même en introduisant un facteur de rafale correctif.

Une simulation numérique plus fine est la Large Eddy Simulation (LES) qui va simuler les équations de Navier Stokes dans le flux (sans faire de moyenne) et utiliser un modèle isotrope pour les abords des parois. Il y a donc moins d'hypothèses.

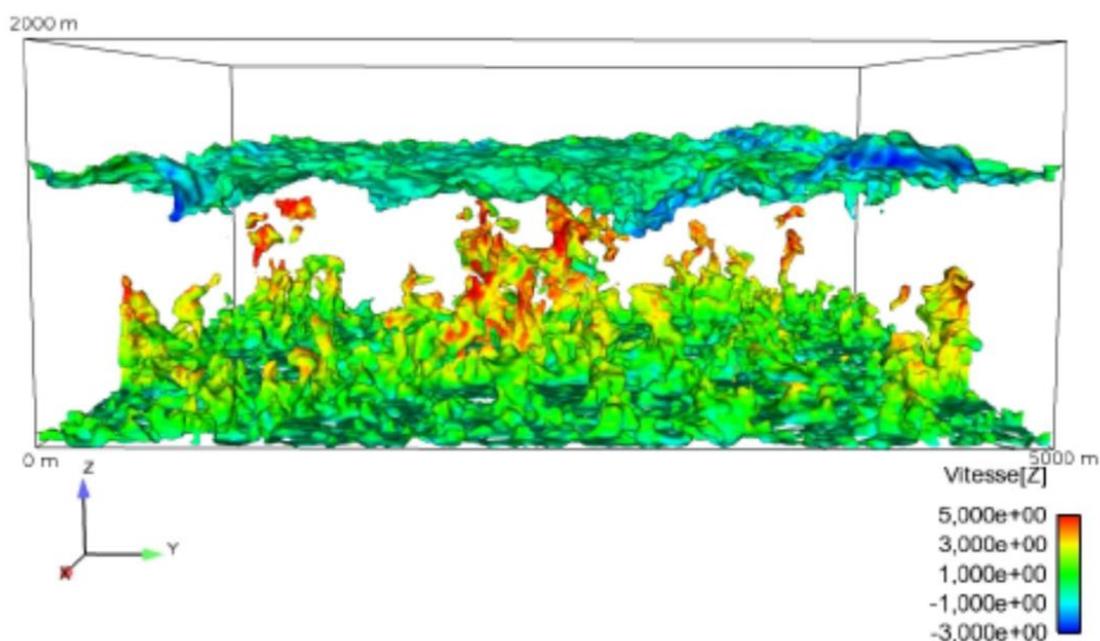


Figure 54 : Vue d'une simulation LES

La modélisation LES permet de voir les écoulements instantanés et donc extrêmes. Elle est particulièrement recommandée pour voir les différentes échelles spatiales et temporelles, en particulier les effets instationnaires et les différentes tailles des tourbillons dus à la turbulence. Elle est donc recommandée pour voir les événements extrêmes qui ne sont visibles que très peu de temps. La modélisation LES demande de gros moyens informatiques car la taille des mailles doit être très petite pour un maillage qui fait plusieurs kilomètres. L'interprétation des résultats est plus compliquée du fait de la présence de nombreuses échelles spatiales et temporelles.

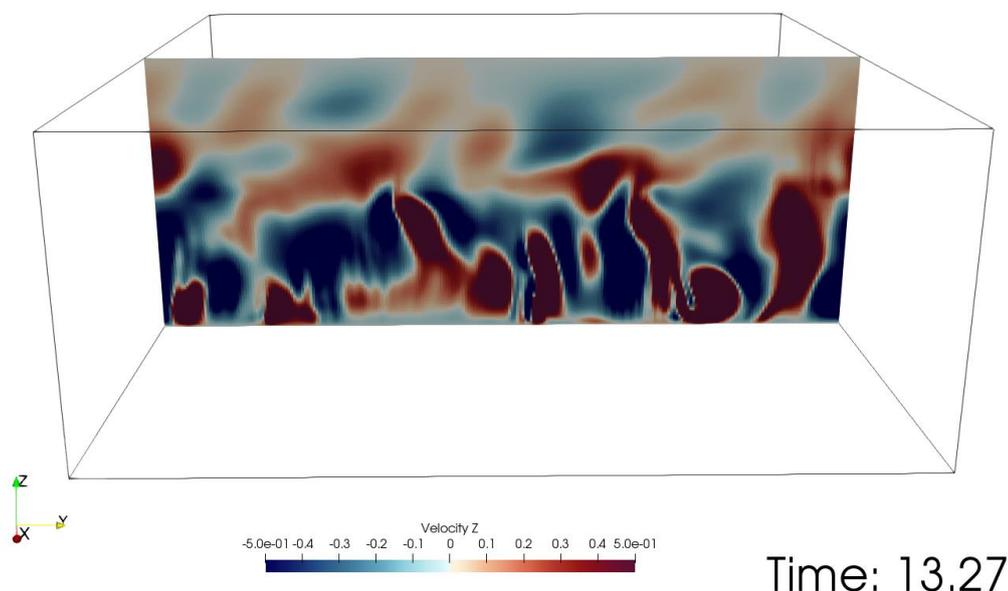


Figure 55 : Vue d'une simulation LES en coupe

Annexe 12. Projectiles considérés aux USA pour les Ouragans - Analyse du Regulatory Guide 1.221 de l'USNRC

Cette annexe a été rédigée par le CEA.

12.1. Examen du Regulatory guide 1.221

Le guide réglementaire RG 1.221 (référence [R1]) publié par l'USNRC en 2011 définit les vitesses de vent de référence des ouragans et les projectiles susceptibles d'être générés par ces derniers. L'objet de cette annexe est de présenter les projectiles considérés dans le RG 1.221 ainsi que les vitesses d'impact de ces derniers.

Le spectre de projectiles considéré pour les ouragans est identique à celui pris en compte pour les tornades et comporte les trois projectiles suivants (voir tableau 1 du RG 1.221) :

- une bille d'acier $\varnothing 25,4$ mm de masse égale à 67 g.
- un tube d'acier $\varnothing 168$ mm long de 4,58 m, de masse égale à 130 kg.
- une automobile de dimensions 1,30 x 2,00 x 5,00 m et de masse égale à 1810 kg.

La vitesse verticale d'impact des projectiles est constante et prise égale à 26 m/s.

Les vitesses horizontales d'impact des projectiles dépendent du type de projectile et de la vitesse de pointe du vent à 10 m au-dessus du sol. Elles sont données dans le tableau 2 du RG 1.221. Il est précisé que les vitesses données dans ce tableau ont été déterminées pour des sites de type « rase campagne » et pour des rafales de vent d'une durée de 3 secondes. Le calcul de ces vitesses est détaillé dans le rapport NUREG/CR-7004 référencé [86].

Comme pour les tornades, l'impact du projectile « automobile » n'est à considérer que sur les points situés à des hauteurs mesurées au-dessus du sol qui sont inférieures à 9,14 m.

Il est précisé que le spectre de projectiles est considéré acceptable pour les nouvelles installations (voir paragraphe C.2 du RG 1.221) mais qu'il n'est pas imposé aux installations existantes (voir conclusion du RG 1.221). Il convient de noter que les vitesses des projectiles indiquées dans le guide 1.221 apparaissent anormalement élevées :

- la vitesse verticale d'impact est de 26 m/s, soit 93,6 km/h,
- pour un vent caractérisé par une vitesse de pointe de 50 m/s à 10 m au-dessus du sol (180 km/h), les vitesses horizontales d'impact du tube d'acier et de l'automobile sont respectivement de 17 m/s (61,2 km/h) et 23,4 m/s (84,2 km/h).

Pour le tube d'acier, la vitesse verticale d'impact est supérieure à celle considérée pour une tornade d'intensité EF3, à savoir 15,1 m/s.

Pour l'automobile, les vitesses d'impact précédentes sont supérieures à celle considérée pour une tornade d'intensité EF3, à savoir 22,7 m/s.

Pour mémoire, la vitesse du vent pour une tornade d'intensité EF3 est de 68 m/s.

Aussi, il convient d'analyser les hypothèses et la méthode de calcul de ces vitesses d'impact.

12.2. Examen du rapport NUREG/CR-7004

L'objet du rapport NUREG/CR-7004 est d'étudier la chute de sept types de projectiles qui sont soumis à une rafale de vent et situés à une hauteur donnée au-dessus de la cible susceptible d'être impactée.

Il ne s'agit donc pas de projectiles soulevés du sol et entraînés par le vent, mais situés initialement à une certaine hauteur au-dessus de la cible potentielle, puis entraînés par le vent et chutant de cette hauteur.

En effet, il est précisé au 1 du paragraphe 3 « Basic assumptions » du rapport NUREG/CR-7004 que, contrairement aux tornades, les courants ascendants des vents des ouragans peuvent être négligés et qu'il en résulte que les forces tendant à augmenter l'élévation du projectile par rapport au sol sont également négligeables. En particulier, aucune force ascendante n'est en mesure de soulever une automobile.

Les hypothèses de l'étude sont les suivantes :

- quatre hauteurs initiales sont considérées : 10, 20, 30 et 40 m,
- deux types de terrains sont pris en compte : rase campagne et zone suburbaine correspondant aux expositions au vent C et B telles que définies dans la référence ASCE 7-05 Standard – Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures – 2006 ;
- le coefficient de traînée aérodynamique de chaque projectile est constant, c'est-à-dire indépendant de sa position et de sa vitesse relative dans le flux de vent.

Les projectiles considérés sont les suivants :

- une bille d'acier \varnothing 25,4 mm de masse égale à 67 g,
- une latte en acier recouverte de PVC de dimensions 0,305 x 3,05 m et de masse égale à 3,8 kg,
- une planche d'une surface de 1 m² et de masse égale à 9,06 kg,
- une dalle de dimensions 1,53 x 3,05 m et de masse égale à 38 kg,
- un tube d'acier \varnothing 168 mm long de 4,58 m, de masse égale à 130 kg,
- une automobile de dimensions 1,30 x 2,00 x 5,00 m et de masse égale à 1810 kg,
- une automobile de dimensions 1,50 x 1,70 x 4,50 m et de masse égale à 1178 kg.

Pour mémoire, la bille et le tube d'acier et les deux automobiles sont les projectiles considérés par l'USNRC pour les tornades.

Pour chaque hypothèse considérée (hauteur de chute, exposition au vent, vitesse de pointe du vent à 10 m au-dessus du sol), le rapport fournit des tableaux donnant pour chacun des projectiles les vitesses horizontale et totale au moment de l'impact.

Les vitesses des projectiles données dans le RG 1.221 sont celles du tableau 1 du rapport NUREG/CR-7004 et ont donc été déterminées pour une chute d'une hauteur de 40 m et un terrain de type « rase campagne ».

Compte tenu des hypothèses prises en compte pour déterminer les vitesses des projectiles données dans le tableau 2 du RG 1.211, ces dernières n'ont donc pas de réalité physique pour les projectiles potentiels situés au niveau ou peu éloignés du sol.

La méthode de calcul des vitesses d'impact présentée dans le rapport NUREG/CR-7004 peut cependant être utilisée pour les projectiles potentiels situés par exemple sur les terrasses d'ouvrages de grande hauteur, au sommet d'une falaise, ou encore sur des arbres dont des branches pourraient être arrachées et entraînées par le vent.

En conclusion, la hauteur de chute de 40 m retenue dans le RG 1.121 pour évaluer les vitesses d'impact étant à la fois irréaliste et très pénalisante, les vitesses données dans le RG 1.121 n'ont aucun sens physique et ne doivent donc pas être retenues pour les installations nucléaires françaises.

12.3. Position CEA vis-à-vis du projectile « Bille d'acier »

Le CEA a précisé sa position vis-à-vis du projectile bille d'acier reprise ci-après.

Le CEA indique que la bille d'acier ne doit pas être considérée à n'importe quelle altitude et que ses vitesses horizontales et verticales peuvent être déterminées par un calcul de balistique. Le CEA justifie cette affirmation ci-dessous.

La clause 7.10 (2) de la norme NF EN 1991-1-4 précise que les coefficients de force horizontal $c_{f,x}$ et vertical $c_{f,z}$ d'une sphère de diamètre b dépendent de la hauteur de référence z_e de son centre de gravité par rapport au sol ou à une surface plane horizontale balayée par ce vent :

- pour $z_e > b$: $c_{f,x}$ est donné par la figure 7.30 de cette norme en fonction du nombre de Reynolds et $c_{f,z} = 0$,
- pour $z_e < b$: $c_{f,x}$ est la valeur déterminée dans le cas précédent multipliée par 1,6 et $c_{f,z} = 0,6$.

Une application de ces coefficients à la bille d'acier de référence montre que pour les vitesses du vent WENRA, le nombre de Reynolds est de l'ordre de 1. 105 à 2. 105. Par conséquent, $c_{f,x} = 0,6$ pour $z_e > b$ et $c_{f,x} = 0,96$ pour $z_e < b$. On montre que :

1° La bille d'acier posée sur le sol ou sur une surface horizontale balayée par le vent ne peut s'envoler qu'au-dessus d'une vitesse de vent de rafale minimale égale à $V_{i,min} = 222$ km/h

$$\text{Avec : } V_{i,min} = \sqrt{\frac{m g}{\frac{1}{2} c_{f,z} \rho A_{ref}}}$$

$$A_{ref} = \pi \frac{b^2}{4}; \quad b = 2,5 \text{ cm};$$

$$m = 70 \text{ g}; \quad g = 9,81 \text{ m. s}^{-2}; \quad c_{f,z} = 0,6; \quad \rho = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}.$$

2° Pour une vitesse de rafale supérieure à 222 km/h, la bille posée au sol ou sur une surface plane s'envole et est soumise à une force résultante dont la composante verticale est la somme algébrique du poids propre et de la force portante et dont la composante horizontale est la force de trainée. L'angle θ de la résultante des forces par rapport à la surface plane horizontale est donné par :

$$\tan \theta = \frac{1}{c_{f,x}} \left(c_{f,z} - \frac{m g}{\frac{1}{2} \rho V_i^2 A_{ref}} \right)$$

Cet angle correspond à l'angle d'incidence initial de la trajectoire de la bille par rapport à la surface plane.

Pour $V_i = 222$ km/h et $z_e = 1,25$ cm on obtient $\theta = 0$; l'angle initial de la trajectoire de la bille est nul et la trajectoire initiale de la bille est donc horizontale ;

Pour $V_i > 222$ km/h et $1,25 \text{ cm} < z_e < 2,5 \text{ cm}$, on obtient $\theta > 0$; l'angle initial de la trajectoire de la bille est positif et la bille se soulève au-dessus de la surface plane

Pour $V_i = 250$ km/h, on obtient $\theta = 7,5^\circ$;

Pour $V_i = 300$ km/h, on obtient $\theta = 15,8^\circ$.

3° La vitesse V_i est la vitesse de la rafale dont la durée caractéristique est de l'ordre de 3 secondes. Après soulèvement de la bille par la rafale, la vitesse du vent évolue autour de sa vitesse moyenne. Par conséquent, les forces aérodynamiques de portance et de trainée varient également autour d'une valeur moyenne inférieure à celle correspondant au soulèvement de la bille. L'accélération de la bille par ce système de forces est donc variable dans le temps et la trajectoire n'est donc pas uniformément accélérée.

4° Si ce système de forces permet néanmoins une élévation de la bille d'une hauteur de 1,25 cm ($z_e > 2,5$ cm), la force portante devient nulle ($c_{f,z} = 0$) et la force de trainée diminue ($c_{f,x}$ passe de 0,96 à 0,6), l'angle θ de la résultante des forces par rapport à l'horizontale devient négatif et augmente en valeur absolue pour l'ordre de grandeur attendu des vitesses du vent WENRA :

Pour $V_i = 250$ km/h, on obtient $\theta = -38,3^\circ$,

Pour $V_i = 300$ km/h, on obtient $\theta = -28,7^\circ$.

Par conséquent, l'élévation de la bille est freinée fortement dès une hauteur $z_e > 2,5$ cm puis la bille redescend lorsque la vitesse verticale devient nulle.

En conclusion, cette analyse montre que la bille d'acier ne peut s'envoler qu'à partir d'une vitesse de vent de rafale de 222 km/h et, dans le cas d'une vitesse supérieure à 222 km/h, ne peut pas s'élever à n'importe quelle hauteur au-dessus de sa surface plane de départ. Il est à noter également qu'une bille initialement accrochée à une surface verticale éloignée du sol ou d'une surface plane (façade d'un bâtiment par exemple) subit une force portante nulle et ne peut donc pas s'élever par rapport à ce point initial.

De manière générale, le CEA indique qu'un projectile situé au sol ou sur une surface plane peut subir une force ascendante (force portante issue d'un vent de direction horizontale) permettant de le soulever si cette force devient supérieure à son poids propre compte tenu de l'effet de cette surface plane mais que cette force diminue ou disparaît lorsque le projectile a atteint une hauteur très faible au-dessus de cette surface. En l'absence de courant ascendant comme celui d'une tornade, l'élévation du projectile est alors freinée fortement puis redescend selon une trajectoire moyenne balistique (la trajectoire réelle varie en fonction des fluctuations du vent autour de sa valeur moyenne). Les élévations au-dessus des surfaces planes de départ sont donc très limitées et peuvent être nulles en l'absence de surface plane horizontale de départ.

Annexe 13. Prise en compte du risque de survitesse des ventilateurs en cas de vents extrêmes par EDF

Les niveaux de vents violents (également appelés « Grands Vents ») retenus dans les études menées actuellement par EDF sont les niveaux définis dans les règles NV65 2009 [60].

Concernant les effets directs des vents extrêmes, la robustesse des installations s'appuie sur les exigences retenues par EDF lors de la conception, de la construction et de l'exploitation des équipements concernés. La résistance des ventilateurs vis-à-vis du phénomène de survitesse fait en particulier l'objet de spécifications d'EDF à la conception.

L'effet de la vitesse du vent sur les ventilateurs dépend de leurs configurations d'installation, des technologies de ventilateurs utilisées et de leurs conceptions. Ces éléments sont détaillés ci-après.

Configuration d'installation sur le parc nucléaire EDF

Sur le parc EDF tous les ventilateurs d'extraction reliés à la cheminée du BAN ne sont pas affectés par les effets de survitesse liés au vent.

Le vent est perpendiculaire au fût et ne peut pas pénétrer dans la cheminée de haut en bas pour atteindre les systèmes de ventilation.

Aucun ventilateur d'extraction relié directement à l'extérieur, monté ou non avec un clapet antiretour ne peut être affecté par les effets du vent. En effet, les ventilateurs d'extraction refoulent l'air à l'extérieur avec une pression dynamique qui s'opposera à la vitesse d'un vent entrant. Dans ces conditions le vent s'opposera à la vitesse de rotation du ventilateur et ne provoquera donc pas d'accélération de celui-ci.

Les ventilateurs de soufflage reliés directement à l'extérieur ou montés peuvent potentiellement être affectés par les risques de survitesse.

Rappel des technologies des ventilateurs utilisés sur le parc nucléaire EDF

Les différentes technologies utilisées sur le parc nucléaire sont de deux types : centrifuge ou axial (hélicoïde).

Cas de la technologie centrifuge

Les ventilateurs de type centrifuge sont peu sensibles aux effets du vent du fait de leur technologie, en effet l'air entre dans la roue avec une vitesse essentiellement axiale et en sort dans une direction sensiblement parallèle à un plan radial.

Ce changement de direction génère une perte de charge qui atténue le phénomène des effets du vent.

Les ventilateurs centrifuges sont généralement sélectionnés pour de plus fortes pressions que les ventilateurs axiaux, ce qui constitue un autre paramètre les rendant moins sensibles aux effets du vent. Ces ventilateurs sont généralement raccordés aux prises d'air via une casemate, un circuit gainé monté avec des accessoires (grille, filtres, batteries) et ne sont donc pas raccordés directement en façade d'un bâtiment.

Cas de la technologie axiale

Les ventilateurs de type axial sont des ventilateurs dont l'air entre dans la roue parallèlement à l'axe et en ressort sensiblement dans la même direction. Lorsqu'ils sont directement exposés aux effets du vent ils peuvent être potentiellement affectés par les risques de survitesse s'ils ne sont pas protégés en amont par une résistance aérodynamique offrant une perte de charge (batterie, grilles).

Conception

Concernant la résistance des paliers, la conception des roulements permet d'absorber des vitesses de rotation jusqu'à 1,4 fois la vitesse normale de rotation.

La résistance des ventilateurs vis-à-vis du phénomène de survitesse fait en particulier l'objet d'essais au titre des spécifications techniques d'EDF. Ces spécifications techniques précisent que les groupes moto-ventilateurs subissent un essai de survitesse à 120 % de sa vitesse nominale, permettant de couvrir les effets de survitesse liés au vent.

Conclusion

Le risque de survitesse est écarté pour les familles de ventilateurs :

- de technologie centrifuge,
- en intérieur et installés sur une extraction ou raccordés à la cheminée du BAN,
- en extérieur à condition d'être placés en aval d'un organe présentant une perte de charge (aéroréfrigérants),
- de technologie axiale dont l'axe est perpendiculaire à la direction du vent.

Le risque de survitesse ne peut pas être écarté pour la famille de ventilateurs de technologie axiale (ou hélicoïde) qui sont directement exposés aux effets du vent dont l'axe est parallèle à la vitesse du vent.

Les spécifications techniques de ces matériels intègrent le risque de survitesse des ventilateurs qui couvrent les effets de survitesse liés au vent. En complément, des études spécifiques d'aéraulique et de mécanique peuvent être menées pour vérifier la tenue de ces matériels au risque de survitesse liée au vent.

Annexe 14. Coefficients de forme des toitures simples définies dans l’Eurocode 1-3 – cas des coefficients de forme des toitures simples (à versants) et cylindrique

14.1. Coefficient de forme des toitures simples

14.1.1. Toitures à un seul versant

Le coefficient de forme μ_1 à utiliser pour les toitures à un seul versant est fonction de la pente de la toiture α dans les cas où la neige n’est pas empêchée de glisser (figures et tableau ci-après). Dans le cas contraire, en présence de barres à neige, acrotères, ..., le coefficient de forme μ_1 ne doit pas être inférieure à 0,8.

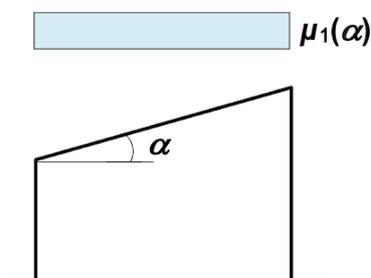


Figure 56 : Coefficient de forme pour une toiture à un seul versant

Tableau 35. Coefficients de forme de la charge de neige en fonction de la pente

α (Angle du toit avec l'horizontale)	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	--

En présence d’obstacles au glissement de la neige, les charges locales devront être calculées séparément selon les règles spécifiques précisées par l’Eurocode 1-3. Ces charges locales s’ajoutent à la charge de neige de la partie courante de la toiture.

14.1.1.1. Toitures à deux versants

Le coefficient de forme μ_2 à utiliser pour les toitures à deux versants est établi selon le Tableau 35.

En présence d’obstacles au glissement de la neige, les charges locales devront être calculées séparément selon les règles spécifiques précisées par l’Eurocode 1-3.

Pour les toitures à deux versants la disposition des charges sur chaque versant de la toiture diffère selon les situations : sans accumulation (cas i) et avec accumulation (cas ii et iii), présentées ci-après.

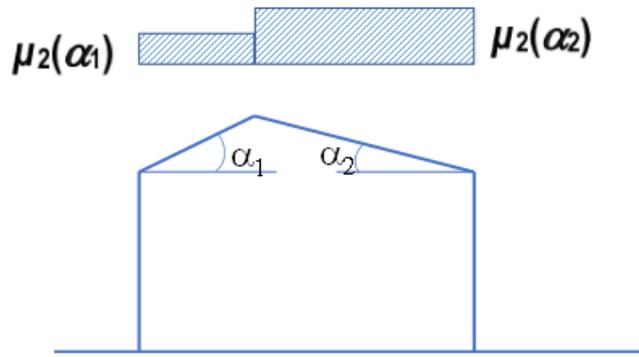


Figure 57 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants sans accumulation (cas i)

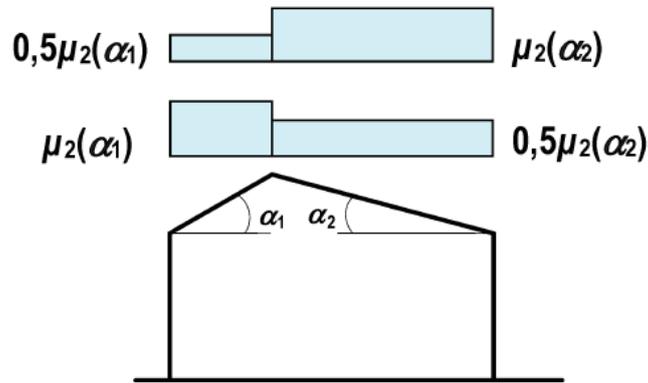


Figure 58 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants avec accumulation (cas ii et iii)

14.1.1.2. Toitures à versants multiples

Les dispositions de charges et les coefficients de formes pour les situations sans accumulation (cas i) sont calculés de la même façon que pour les toitures à deux versants.

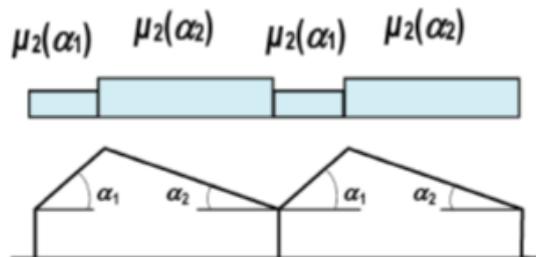


Figure 59 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiples sans accumulation (cas i)

La disposition de charges avec accumulation (cas ii) nécessite d'introduire un coefficient de forme particulier μ_3 pour l'évaluation des charges dans les parties en creux de la toiture (Figure 60 et Tableau 35).

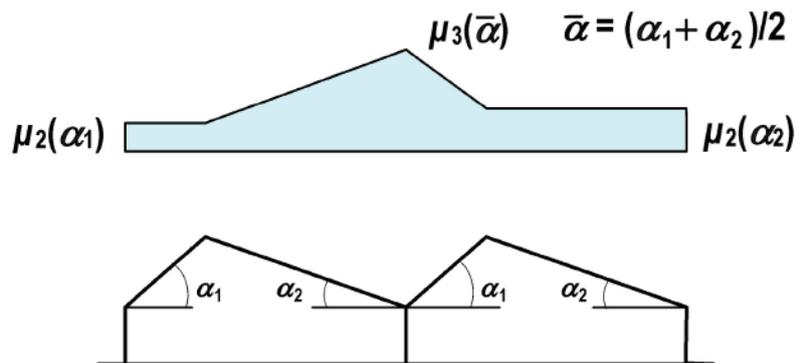


Figure 60 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiples avec accumulation (cas ii)

Une attention particulière doit être portée au cas où un versant ou les deux versants des noues de la toiture ont une pente supérieure à 60°. L'annexe nationale indique qu'une analyse particulière doit être faite si l'une des pentes est supérieure à 60° et l'autre pente supérieure à 45°.

14.1.2. Evolution de l'Eurocode 1-3 pour les toitures simples

Dans le projet de révision de l'Eurocode 1-3, le coefficient d'exposition C_e n'intervient plus comme multiplicateur de la charge de neige sur la toiture. Il devient un paramètre dans les expressions analytique qui déterminent la valeur du coefficient de forme μ . Le texte distingue les toitures plates (de pente inférieure à 5°) et les toitures à versants inclinés.

a) Toitures plates

Le coefficient de forme pour les toitures plates est : $\mu_1 = 0,8 \times C_{e,F}$

Où $C_{e,F}$ est le coefficient d'exposition spécifique aux toitures plates dont la valeur est déterminée par les dimensions horizontales de la construction (longueur L et largeur W).

Une longueur de toit efficace L_c (en m) est définie : $L_c = 2W - W^2/L$.

Le coefficient $C_{e,F}$ prend la valeur : $C_{e,F} = \begin{cases} C_e & \text{pour } L_c \leq 50m \\ C_e + (1,25 - C_e) \frac{L_c - 50}{350} & \text{pour } 50 < L_c < 400m \\ 1,25 & \text{pour } L_c \geq 400m \end{cases}$

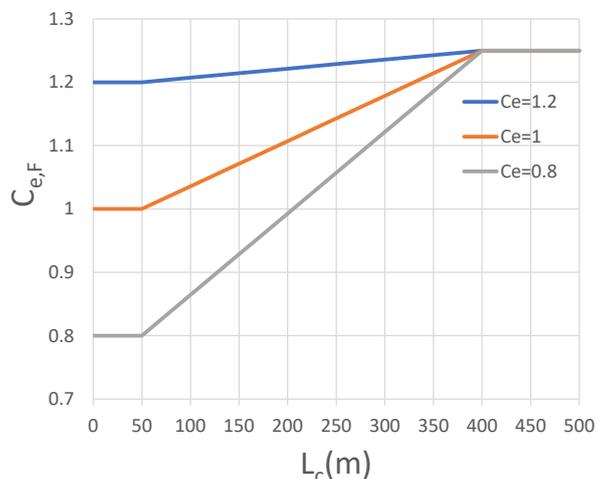


Figure 61 : Coefficient d'exposition pour les toitures plates

b) Toitures à un ou deux versants inclinés

Pour traiter le cas des toitures à versants inclinés, le projet de révision de l’Eurocode 1-3 définit le coefficient de forme μ_2 comme le résultat de la somme de deux termes $\mu_{2,b}$ et $\mu_{2,w}$, qui rendent compte respectivement de la charge de base et de la charge induite par les effets du vent.

Le calcul du coefficient $\mu_{2,b}$ est similaire à celui qui est présent dans la norme actuelle d’avril 2004 avec une modification des valeurs extrêmes des pentes de toiture (5° à 70°). Il intègre donc l’influence des conditions d’exposition au vent définies par le coefficient C_e .

Tableau 36. Coefficients de forme de base en fonction de la pente pour une toiture à versants inclinés

α pente selon l’horizontale	$5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 70^\circ$	$70^\circ < \alpha$
$\mu_{2,b}(\alpha, C_e)$	$0,8 C_e$	$0,8 C_e (70-\alpha)/40$	0

Le second terme $\mu_{2,w}$ restitue l’effet de transport de la neige par le vent. Il comporte un facteur δ à la discrétion de l’annexe nationale, permettant d’annuler ce second terme. Cette disposition est le résultat d’un compromis pour accorder les parties prenantes de la discussion active qui a suivi la diffusion des versions préliminaires de la révision de la norme.

Tableau 37. Coefficients de forme pour la neige transportée par le vent en fonction de la pente pour une toiture à versants inclinés ($\delta=0,16$, sauf indication de l’annexe nationale)

α pente selon l’horizontale	$5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 70^\circ$	$70^\circ < \alpha$
$\mu_{2,w}(\alpha, C_e)$	$\delta(6 - 5C_e) \frac{(\alpha - 5)}{25}$	$\delta(6 - 5C_e) \frac{(70 - \alpha)}{40}$	0

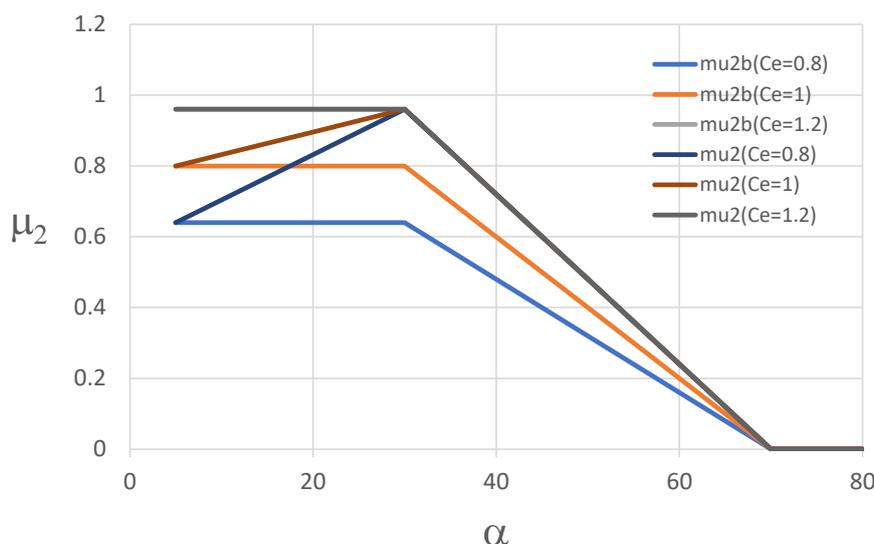


Figure 62 : Coefficient de forme pour toitures inclinés (avec $\delta=0,16$)

Pour les toitures à un seul versant, seul le cas de charge uniforme est adapté et est calculé avec le coefficient de forme $\mu_2(\alpha, C_e) = \mu_{2,b}(\alpha, C_e)$.

Pour les toitures à deux versants, la disposition des charges dans le cas sans accumulation (cas i) et la détermination du coefficient de forme de chaque versant sont identiques au cas de la toiture à un seul versant $\mu_2(\alpha_i, C_e) = \mu_{2,b}(\alpha_i, C_e)$ (figure ci-après).

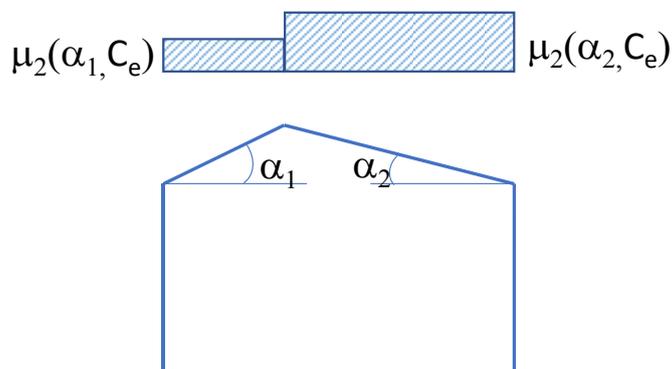


Figure 63 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants sans accumulation (cas i)

Pour le cas avec accumulation (cas ii et iii, Figure 64), le calcul considère successivement les cas de chargement de chaque versant avec le coefficient de forme $\mu_2 = \mu_{2,b} + \mu_{2,w}$, alors que le versant opposé est libre de toute charge de neige.

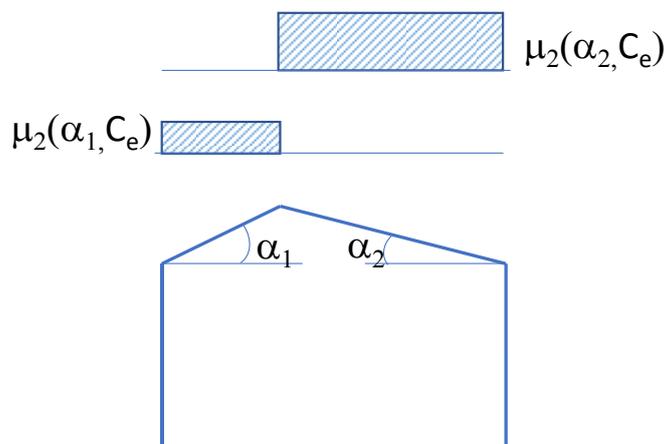


Figure 64 : Coefficient de forme pour une toiture à deux versants avec accumulation (cas ii et iii)

c) Toitures inclinées à versants multiples

Le cas sans accumulation (cas i) est calculé avec le coefficient de forme $\mu_2(\alpha, C_e) = \mu_{2,b}(\alpha, C_e)$ pour les versants de toiture périphériques. Le coefficient de forme pour les vallées en partie courante de la toitures (entre deux versants se faisant face) est uniforme et égale à celui d'une toiture de pente 30° avec un coefficient d'exposition égale à 1 ; $\mu_2(\alpha, C_e) = \mu_{2,b}(30, 1) = 0,8$.

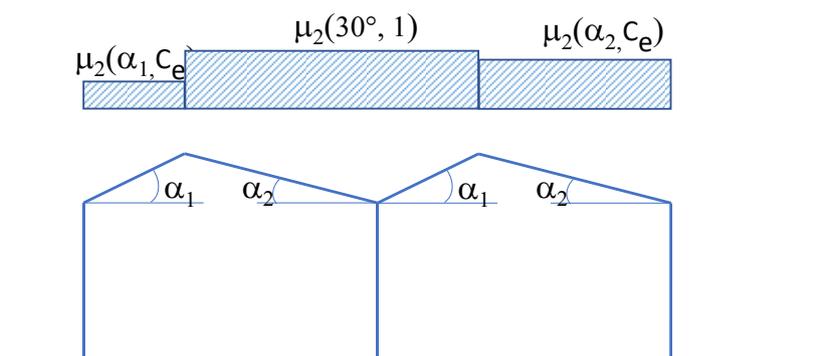


Figure 65 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiple sans accumulation (cas i)

Le cas avec accumulation (cas ii) considère que les versants de toitures périphériques ne sont pas chargés. La charge des parties de toitures constituées par les vallées est calculée avec le coefficient de forme $\mu_2(\alpha, C_e) = \mu_{2,b}(\alpha, C_e)$ au niveau de chaque arête et un coefficient de forme $\mu_3(\alpha)$ à l'aplomb de la noue, tel que :

$$\mu_3(\alpha) = 0,9 + 0,7 \frac{\alpha}{30}, \text{ avec } \mu_3 \leq \frac{\gamma h}{C_{t s_k}} \leq \mu_{3max}$$

Où h est la hauteur de la vallée entre les versants de toitures, γ est la densité de la neige qui doit être spécifiée, et α est la moyenne arithmétique des deux versants de toiture se faisant face $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$. La valeur maximum de μ_{3max} est 1,6 sauf indication différente de l'annexe nationale.

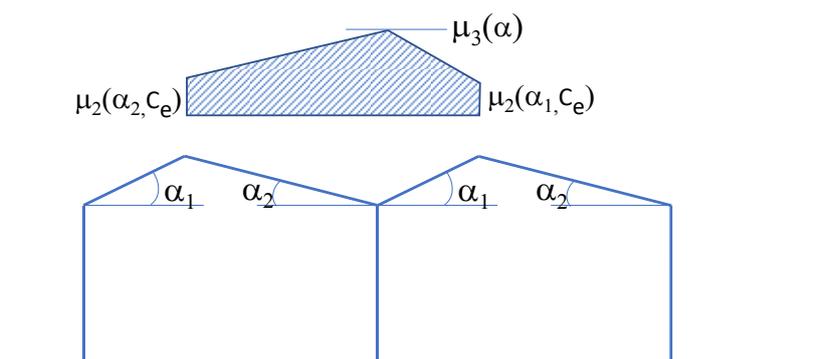


Figure 66 : Coefficient de forme pour une toiture à versants multiples avec accumulation (cas ii)

14.2. Toitures cylindriques

14.2.1. Version actuelle de l'Eurocode 1-3

La disposition de charges sur les toitures cylindriques nécessite de définir le coefficient de forme μ_4 (Tableau 38). Pour l'évaluation des charges sans accumulation (cas i) le coefficient de forme est constant sur la partie de toiture dont la pente est inférieure à 60° (figures et tableau ci-après).

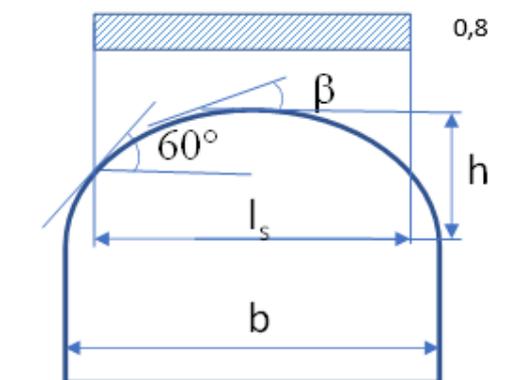


Figure 67 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique sans accumulation (cas i)

Tableau 38. Coefficients de forme en fonction de la pente pour une toiture cylindrique

β pente selon l'horizontale	$\beta \leq 60^\circ$	$60^\circ < \beta$
μ_4	$0,2 + 10 h/b$ (max $\mu_4 = 2$)	0,0

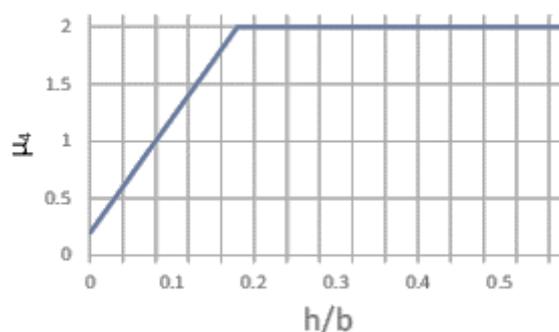


Figure 68 : Coefficient de forme en fonction du ratio h/b pour une toiture cylindrique (pour $\beta \leq 60^\circ$)

La disposition de charges avec accumulation (cas ii) introduit une dissymétrie du chargement de part et d'autre du faitage (figure ci-après).

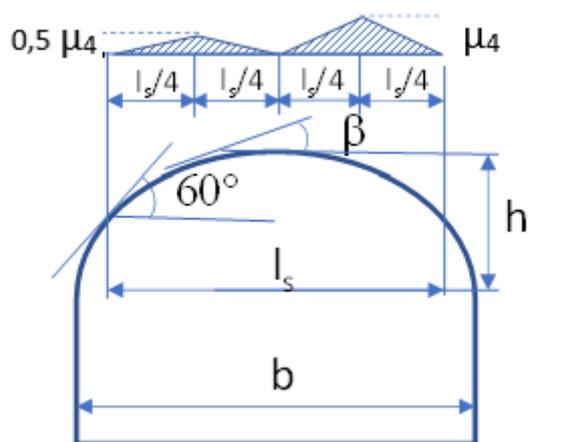


Figure 69 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique avec accumulation (cas ii)

14.2.2. Projet d'évolution de l'Eurocode 1-3 pour les toitures cylindriques et les dômes

Pour l'évaluation des charges sans accumulation (cas i) le coefficient de forme est constant sur la partie de toiture dont la pente est inférieure à 70°.

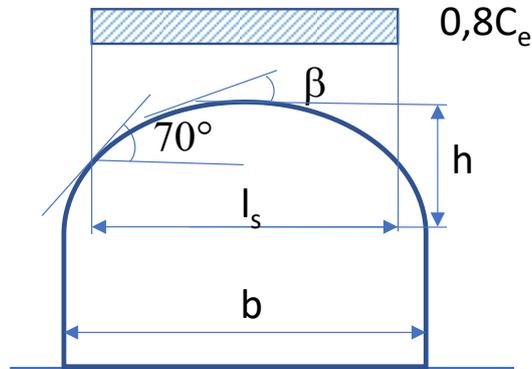


Figure 70 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique sans accumulation (cas i)

La disposition de charges avec accumulation (cas ii) considère le chargement sur un seul versant de la toiture. Le calcul nécessite un coefficient de forme particulier μ_4 tel que : $\mu_4 = (0,2 + 10 h/b)/C_e$ avec $\mu_4 \leq 2/C_e$

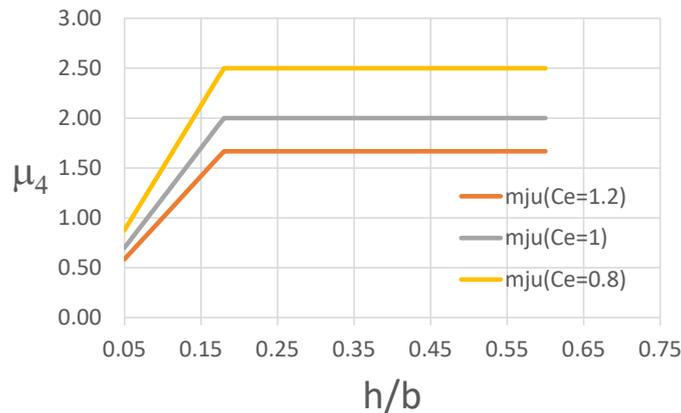


Figure 71 : Coefficient de forme en fonction du ratio h/b pour une toiture cylindrique

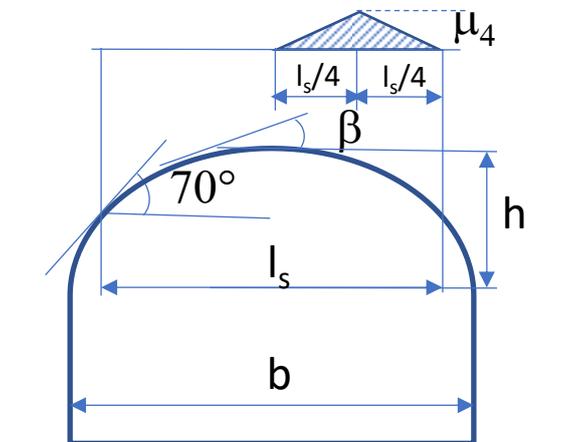


Figure 72 : Coefficient de forme pour une toiture cylindrique avec accumulation (cas ii)

Les dispositions de charges sur les toitures cylindriques sont adaptées pour le calcul des charges sur les dômes sphériques. Le coefficient de forme pour la charge uniforme est similaire à celle des toitures cylindriques.

La charge dissymétrique résultant du cas avec accumulation est limitée dans sa répartition angulaire à 105° (figure ci-après).

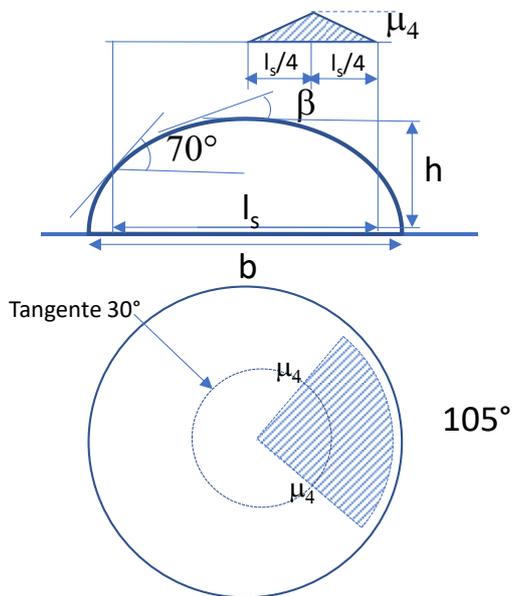


Figure 73 : Coefficient de forme pour une toiture dôme sphérique avec accumulation (cas ii)

IRSN
Pôle Santé et Environnement
Direction de l'Environnement

E-mail
contact@irsn.fr

N° du rapport
Rapport IRSN 2023-00142
Tous droits réservés IRSN
Mars 2023

Photo de couverture :
Feifei Cui-Paoluzzo

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31 av. de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

B.P 17 - 92260 Fontenay-aux-Roses

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET

www.irsn.fr

MEMBRE DE
ETSON