



**Section Etudes
et Climatologie**

BP 49139
35091 RENNES Cedex 9

Réalisation :

Franck BARAER
Catherine CONSEIL
Hervé LE CAM
Thumette MADEC

Apport de l'ÉOLIEN BRETON

pour

la PRODUCTION ÉLECTRIQUE

en PÉRIODES DE GRAND FROID



*Etude réalisée
par Météo France
pour*

*la Direction du Climat,
de l'Environnement,
de l'Eau
et de la Biodiversité
REGION BRETAGNE*

Septembre 2011

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

PARTIE 1. CLIMATOLOGIE A PARTIR DES DONNEES QUOTIDIENNES	2
1.1. DONNEES UTILISEES	2
1.2. VARIABILITE TEMPORELLE POUR LES SERIES DE DONNEES	3
1.2.1. Brest.....	4
1.2.2. Lorient	7
1.2.3. Rennes	10
1.2.4. Rostrenen.....	13
1.2.5. Saint-Brieuc.....	16
1.2.6. Quimper.....	19
1.2.7. Dinard	22
1.3. VARIATION SPATIALE	25
1.3.1. Hiver « froids » 1956, 1963 et 2006	25
1.3.2. Hiver « doux » 1975, 1995 et 2007.....	26
1.3.3. Commentaire	27
1.4. CONCLUSION	28
PARTIE 2. CLIMATOLOGIE A PARTIR DES DONNEES HORAIRES.....	30
2.1. OBJECTIFS ET DONNEES UTILISEES	30
2.1.1. Objectifs.....	30
2.1.2. Données utilisées.....	30
2.2. DETERMINATION DE 100 A 200 DATES DE GRAND FROID	31
2.2.1. Méthode générale	31
2.2.2. Pondération par la population dans le calcul d'un indicatif thermique régional.....	32
2.2.3. Echantillonnage de dates typiques de grand froid en Bretagne	33
2.2.3.1. Résultats de la classification en fonction des "températures minimales par créneau"	33
2.2.3.2. Echantillonnage à partir d'un indicateur thermique régional.....	35
2.2.3.3. Comparaison avec les dates alertes "écowatt"	37
2.3. ETUDE STATISTIQUE ET DESCRIPTIVE DE L'ECHANTILLON DE "CRENEAUX DE GRAND FROID"	41
2.3.1. "Températures minimales par créneau" dans les stations.....	41
2.3.2. Répartition en fonction des mois	44
2.3.3. Evolution au cours des années	45
2.3.4. Durée des épisodes	46
2.4. CONCLUSION SUR L'ECHANTILLONNAGE DE SITUATIONS DE GRAND FROID	53
PARTIE 3. POTENTIEL EOLIEN PAR GRAND FROID	55
3.1. CONTEXTE.....	55
3.2. METHODE D'ESTIMATION DU POTENTIEL EOLIEN	56
3.2.1. Estimation du vent : le modèle Aladin.....	56
3.2.2. Courbe de puissance des machines	59
3.3. ELEMENTS DE VALIDATION	61
3.3.1. Méthode de calcul et choix du niveau de référence.....	62
3.3.2. Validation mensuelle de la méthode sur le parc de Plélan (35).....	62
3.3.3. Autres données de validation.....	63
3.4. ESTIMATION DU POTENTIEL EOLIEN ACTUEL	65
3.4.1. Regroupement de parcs (méthode des grappes).....	65
3.4.2. Notion de pourcentage de puissance disponible.....	69
3.4.4. Analyse du potentiel actuel.....	73
3.5. ESTIMATION DU POTENTIEL EOLIEN FUTUR PAR GRAND FROID	75
3.5.1. Apport des parcs terrestres en projet	76
3.5.2. Apport potentiel des fermes « off shore »	76
3.5.3. Synthèse globale	79
3.5.4. Lieux d'implantation avec le meilleur potentiel	80
3.6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	84

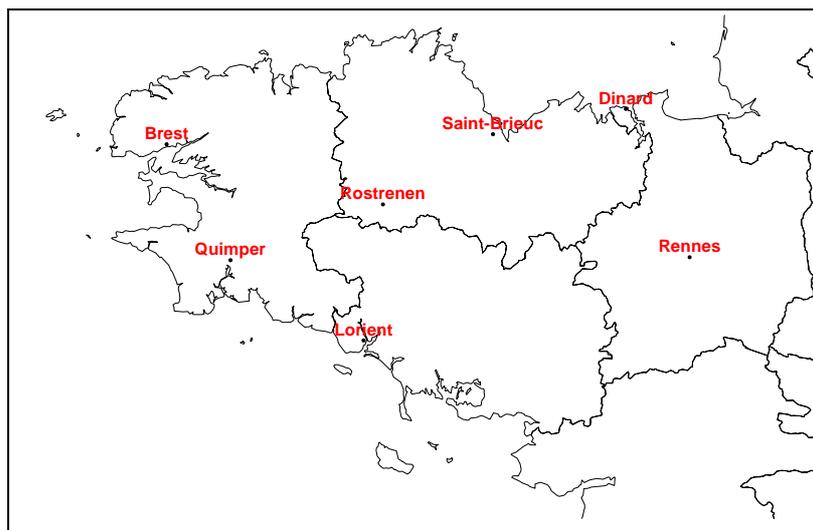
Partie 1. Climatologie à partir des données quotidiennes

Cette étude s'effectue à partir de plusieurs longues séries de données de mesures de températures quotidiennes (minimale/maximale) sur une profondeur de plusieurs dizaines d'années.

Météo-France dispose d'une base de données climatologiques (BDCLIM) dans laquelle sont conservées les valeurs contrôlées de plusieurs paramètres. Ces données proviennent de stations automatiques et d'observateurs bénévoles répartis dans chaque département breton.

Le choix se porte sur :

- 4 longues séries de données représentatives des grandes métropoles de Brest, Lorient et Rennes (stations de Brest-Guipavas, Lorient Lann-Bihoué, Rennes-Saint-Jacques) et de Dinard (station de Pleurtuit)
- 2 séries de données plus courtes pour les métropoles de Quimper et Saint-Brieuc (station de Quimper Pluguffan, Saint-Brieuc Trémuson)
- 1 longue série en centre Bretagne (station de Rostrenen)



Carte 1.1 : sites utilisés pour cette étude

1.1. Données utilisées

La mesure de la température à Météo-France s'effectue à l'aide de sondes thermométriques à résistances de platine placées à l'intérieur d'un abri et situées à 1,50 mètres au-dessus du sol dans un environnement normé (sol engazonné et à distance d'arbres ou de bâtiments). L'abri protège le capteur de l'action du vent, du soleil et des précipitations.

Les températures minimale (TN) et maximale (TX) quotidiennes sont utilisées.

La température minimale (TN) est la température la plus basse mesurée entre 18 heures UTC la veille et 18 heures UTC le jour J. Elle se produit le plus souvent en fin de nuit.

La température maximale (TX) est la température la plus élevée mesurée entre 6 heures UTC le jour J et 6 heures UTC le lendemain. Elle est atteinte le plus souvent dans l'après-midi. Les normales utilisées à Météo-France sont calculées sur une période de 30 ans (actuellement 1^{er} janvier 1971 - 31 décembre 2000).

L'heure UTC correspond à l'heure du méridien de Greenwich. L'heure locale en hiver s'obtient en ajoutant 1 heure à l'heure UTC (exemple : 6 UTC = 7 heures locales). En été il convient d'ajouter deux heures.

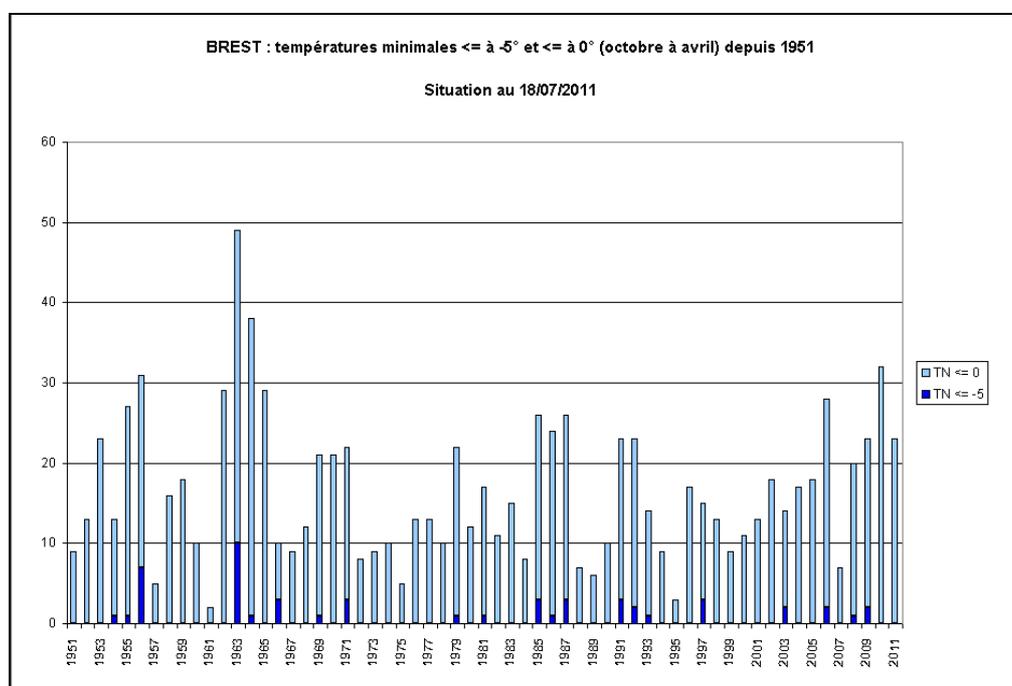
Pour cette étude, la période hivernale utilisée s'étend du mois d'octobre de l'année N-1 au mois d'avril de l'année N : **exemple l'hiver 1963 comprend les mois d'octobre de novembre et de décembre 1962 et les mois de janvier, février, mars et avril de 1963.**

1.2. Variabilité temporelle pour les séries de données

Les hivers en Bretagne sont parfois rigoureux (1956, 1963) ou doux (1961, 1995). La variabilité climatique explique ces différences. La position hivernale de la dépression d'Islande, de l'anticyclone des Açores et de l'anticyclone de Sibérie influent sur les conditions météorologiques. Les vents d'Ouest à Sud-Ouest sur les côtes bretonnes, favorisés par une présence régulière de la dépression d'Islande, amènent un temps doux souvent humide et venté. Une présence prolongée de l'anticyclone de Sibérie amène de l'air continental froid et sec poussé par un vent d'Est à Nord-Est sur la région bretonne. Cette situation provoque les hivers les plus rigoureux.

1.2.1. Brest

Les données utilisées proviennent de la station météorologique située sur la commune de Guipavas à proximité de l'aéroport.



Graphie 1.1 : températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ et -5°C entre octobre et avril depuis l'hiver 1951

Ce graphe présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0°C (couleur bleu clair : exemple hiver 1963, 49 jours avec $\text{TN} \leq 0^{\circ}\text{C}$) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5°C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1963, 10 jours avec $\text{TN} \leq -5^{\circ}\text{C}$) pour chaque hiver depuis 1951 à Brest-Guipavas. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1951 s'étend d'octobre 1950 à avril 1951.

L'hiver 1963 est le plus froid depuis 1951.

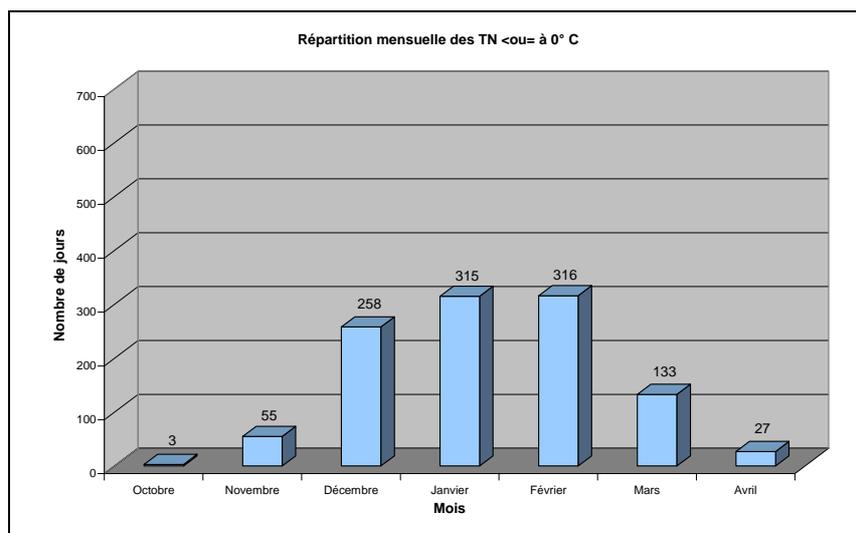
Les hivers 1961 et 1995 furent très doux avec respectivement 2 et 3 jours avec des TN inférieures ou égales à 0°C et aucune TN inférieure ou égale à -5°C .

La **normale sur 30 ans** (1971-2000) du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C est de **13,6 jours par année** et avec une TN inférieure ou égale à -5°C de **0,6 jour par année**.

La moyenne des dix dernières années (2001 à 2010) présente une nette augmentation de nombre de jours pour les TN inférieures ou égales à 0°C (**20,2 jours**). Pour les TN inférieures ou égales à -5°C la moyenne sur les 10 dernières années (2001-2010) est de **0,7 jour**, très légèrement supérieure à la normale sur 30 ans.

La différence importante, entre la moyenne des dix dernières années et celle sur 30 ans (normale), du nombre de jours pour les TN inférieures ou égales à 0°C s'explique par une augmentation des directions de vent comprises entre le Nord-Nord-Ouest et l'Est au détriment des directions comprises entre le Sud-Ouest et l'Ouest-Nord-Ouest.

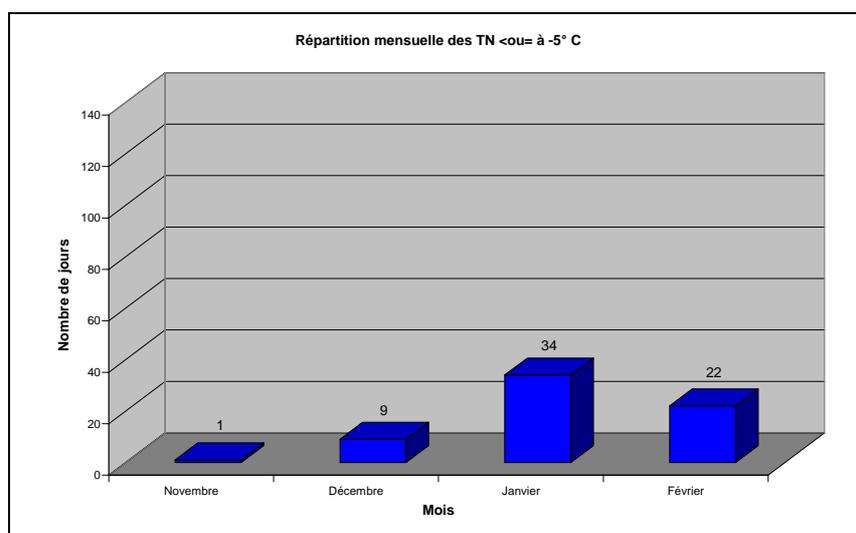
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graph 1.2 : répartition mensuelle des $TN \leq 0^{\circ}C$ à Brest pour 66 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à $0^{\circ}C$ pour les hivers de 1946 à 2011 pour Brest-Guipavas. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **80 %** des **1 107 journées** où des TN inférieures ou égales à $0^{\circ}C$ sont observées.

La température minimale relevée à Brest-Guipavas date du 28 janvier 1947 avec $-14^{\circ}C$.



Graph 1.3 : répartition mensuelle des $TN \leq -5^{\circ}C$ à Brest pour 66 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à $-5^{\circ}C$ pour les hivers de 1946 à 2011 pour Brest-Guipavas. Les mois de **janvier** et **février** représentent **85 %** des **66 journées** où la TN est inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$. Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$ en octobre, mars et avril.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

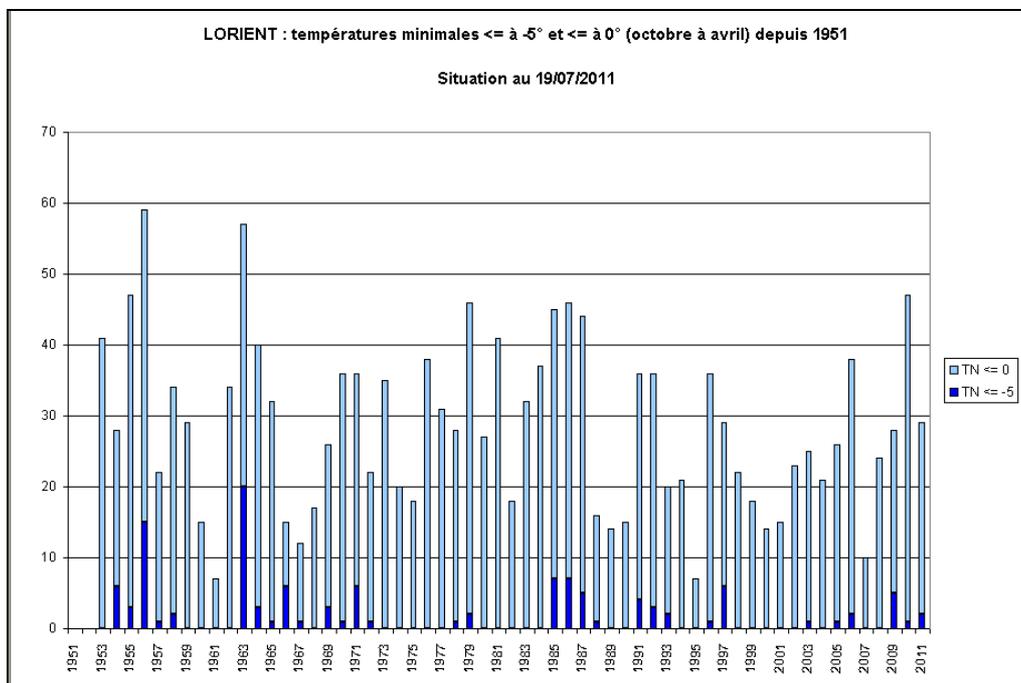
Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
1 107	441	29

*Tableau 1.1 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Brest*

Le tableau 1.1 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

1.2.2. Lorient

Les données utilisées proviennent de la station de Lann-Bihoué sur la base aéronavale.



Graph 1.4 : températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ et -5°C entre octobre et avril depuis l'hiver 1953

Ce graph présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0°C (couleur bleu clair : exemple hiver 1956, 59 jours avec une $TN \leq 0^{\circ}\text{C}$) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5°C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1963, 20 jours avec une $TN \leq -5^{\circ}\text{C}$) pour chaque hiver depuis 1953 à Lorient Lann-Bihoué. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1953 s'étend d'octobre 1952 à avril 1953.

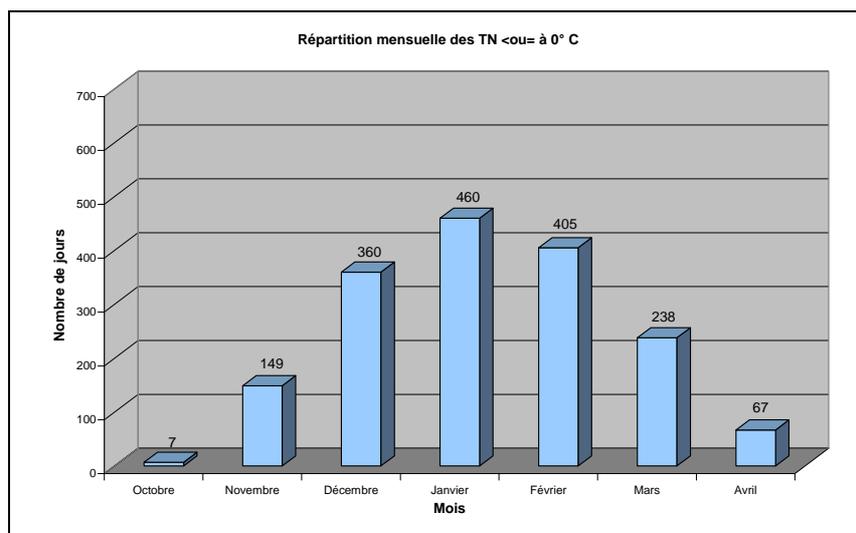
L'hiver 1956 comporte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C (59 dates). L'hiver 1963 compte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à -5°C (20 dates).

Les hivers 1961 et 1995 furent très doux avec 7 jours avec des TN inférieures ou égales à 0°C et aucune TN inférieure ou égale à -5°C .

La **normale sur 30 ans** (1971-2000) du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C est de **28,2 jours par année** et avec une TN inférieure ou égale à -5°C de **1,4 jour par hiver**.

Les dix dernières années de 2001 à 2010 présentent une moyenne de **27,9** dates où la TN est inférieure ou égale à 0°C , légèrement en dessous de la normale sur 30 ans et **1,2 jour** où la TN est inférieure ou égale à -5°C également légèrement en dessous de la normale sur 30 ans.

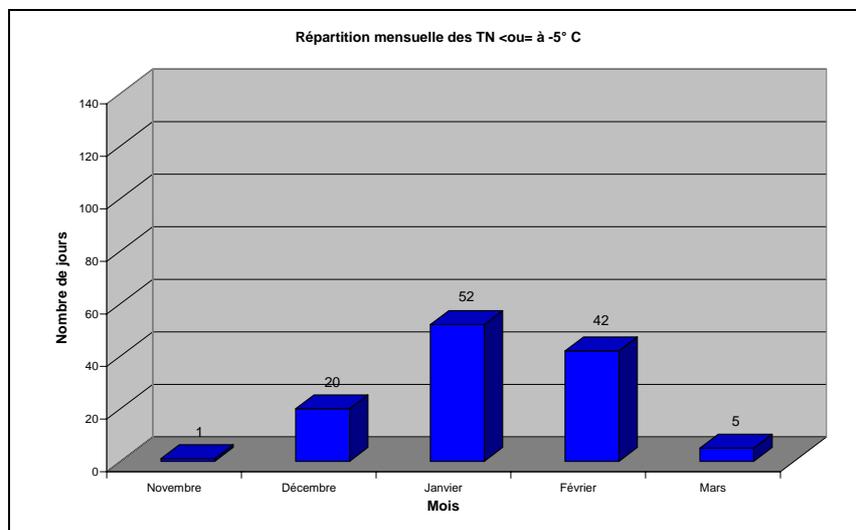
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graph 1.5 : répartition mensuelle des TN $\leq 0^{\circ}\text{C}$ à Lorient pour 59 périodes hivernales

Ce graphe montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à 0°C pour les hivers de 1953 à 2011 pour Lorient Lann-Bihoué. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **73 %** des 1 686 journées où des TN inférieures ou égales à 0°C sont observées.

La température minimale relevée à Lorient Lann-Bihoué date du 20 janvier 1963 avec $-13,1^{\circ}\text{C}$.



Graph 1.6 : répartition mensuelle des TN $\leq -5^{\circ}\text{C}$ à Lorient pour 59 périodes hivernales

Ce graphe montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à -5°C pour les hivers de 1953 à 2011 pour Lorient Lann-Bihoué. Les mois de **janvier** et **février** représentent **78 %** des 120 journées où la TN est inférieure ou égale à -5°C . Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à -5°C en octobre et avril.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

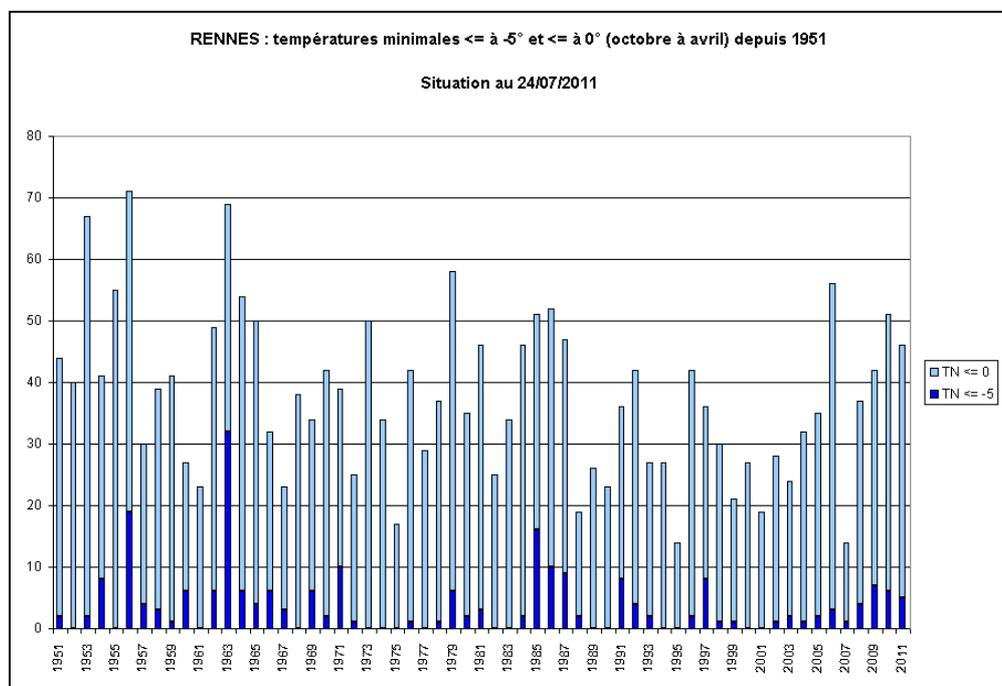
Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
1 686	480	60

*Tableau 1.2 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Lorient*

Le tableau 1.2 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

1.2.3. Rennes

Les données utilisées proviennent de la station de Saint-Jacques-de-la-Lande, commune sur laquelle est implanté l'aéroport de Rennes Saint-Jacques.



Graph 1.7 : températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ et -5°C entre octobre et avril depuis l'hiver 1951

Ce graphique présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0°C (couleur bleu clair : exemple hiver 1956, 71 jours avec une $TN \leq 0^{\circ}\text{C}$) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5°C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1963, 33 jours avec une $TN \leq -5^{\circ}\text{C}$) pour chaque hiver depuis 1951 à Saint-Jacques-de-la-Lande. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1953 s'étend d'octobre 1952 à avril 1953.

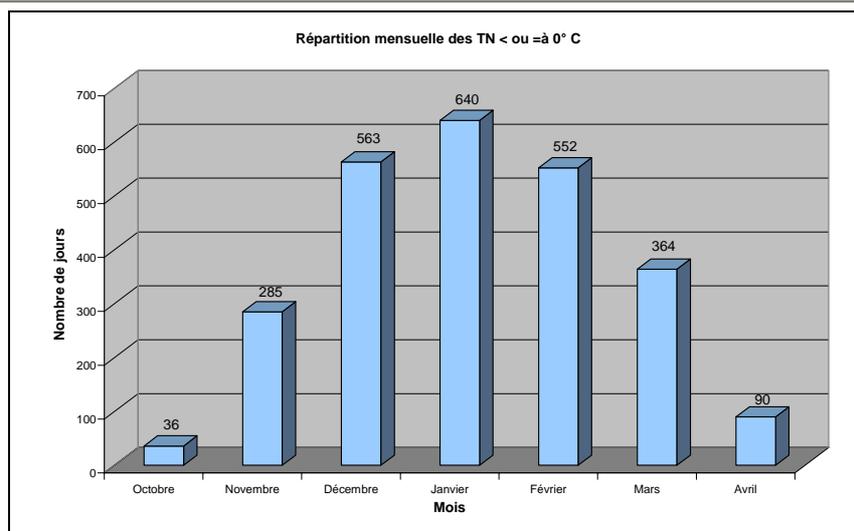
L'hiver 1956 comporte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C (71 dates). L'hiver 1963 compte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à -5°C (33 dates).

L'hiver 1995 fut le plus doux avec 14 jours avec des TN inférieures ou égales à 0°C et aucune TN inférieure ou égale à -5°C .

La **normale sur 30 ans** (1971-2000) du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C est de **34,5 jours par hiver** et avec une TN inférieure ou égale à -5°C de **2,8 jours par hiver**.

Les dix dernières années de 2001 à 2010 présentent une moyenne de **36,1** dates où la TN est inférieure ou égale à 0°C , légèrement au-dessus de la normale sur 30 ans et de **3,2** journées où la TN est inférieure ou égale à -5°C , également légèrement au-dessus de la normale sur 30 ans.

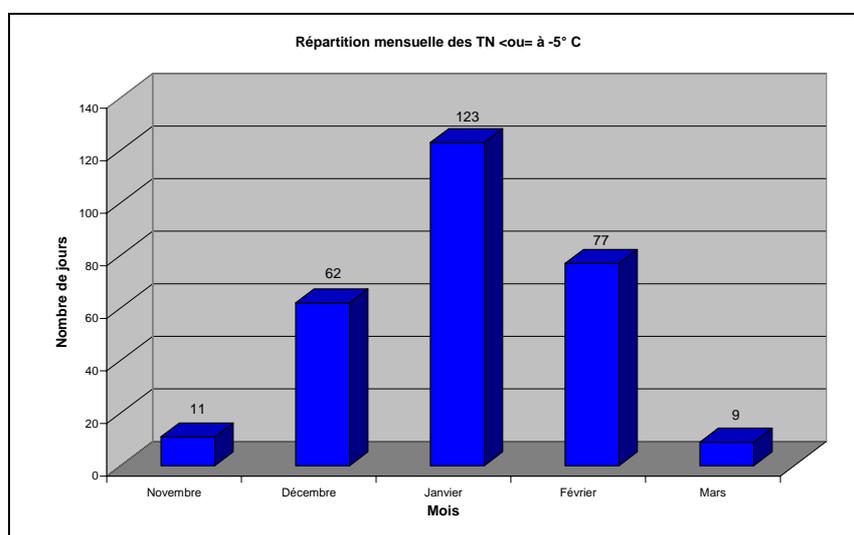
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graph 1.8 : répartition mensuelle des TN ≤ 0 °C à Rennes pour 66 périodes hivernales

Ce graphe montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à 0 °C pour les hivers de 1946 à 2011 pour la station de Rennes Saint-Jacques. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **69 %** des 2 530 journées où des TN inférieures ou égales à 0 °C sont observées.

La température minimale relevée à Rennes Saint-Jacques date du 17 janvier 1985 avec $-14,7$ °C.



Graph 1.9 : répartition mensuelle des TN ≤ -5 °C à Rennes pour 66 périodes hivernales

Ce graphe montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à -5 °C pour les hivers de 1946 à 2011 pour Rennes Saint-Jacques. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **93 %** des 282 journées où la TN est inférieure ou égale à -5 °C. Les mois de novembre et de mars connaissent peu de jours avec une TN inférieure ou égale à -5 °C. Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à -5 °C en octobre et avril.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

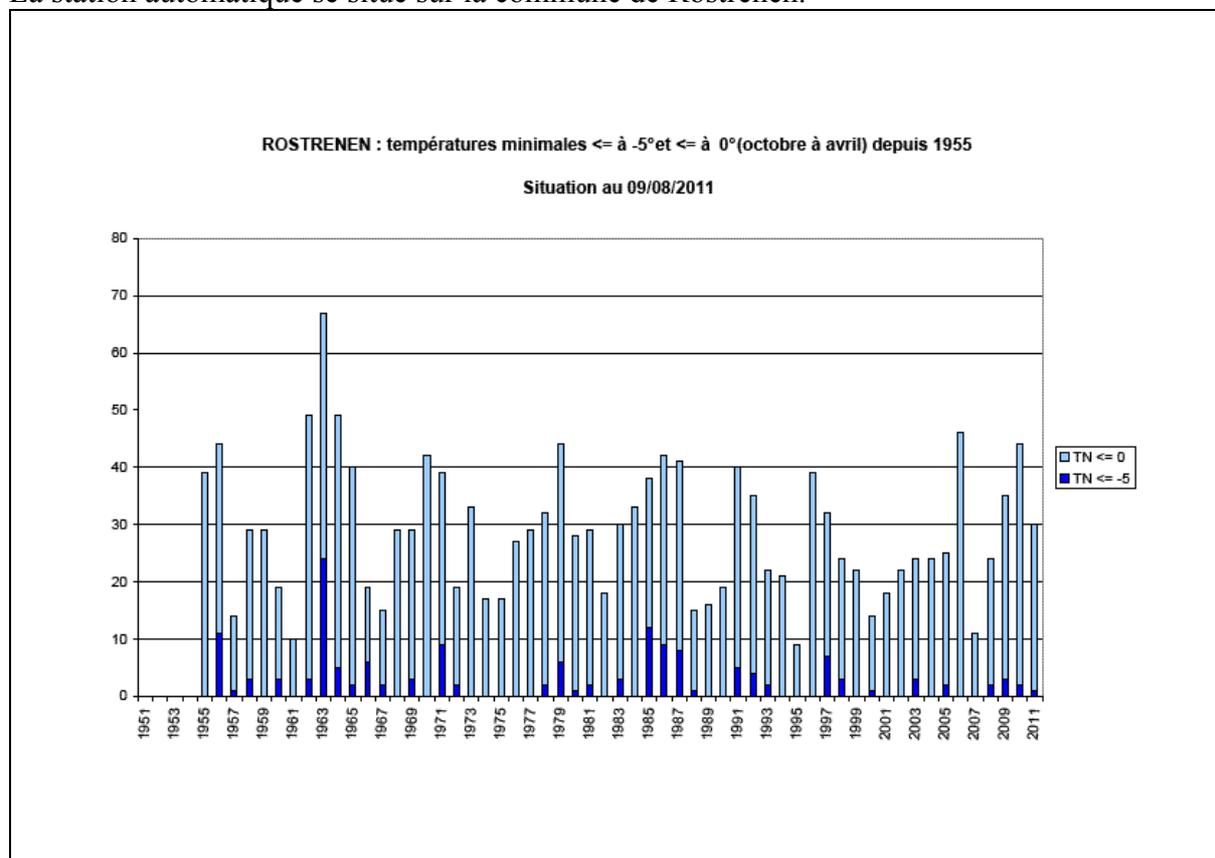
Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
2 530	920	142

*Tableau 1.3 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Rennes*

Le tableau 1.3 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

1.2.4. Rostrenen

La station automatique se situe sur la commune de Rostrenen.



Graphe 1.10 : températures minimales $\leq 0^{\circ}$ C et -5° C entre octobre et avril depuis l'hiver 1955

Ce graphe présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0° C (couleur bleu clair : exemple hiver 1963, 67 jours avec une $TN \leq 0^{\circ}$ C) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5° C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1963, 24 jours avec une $TN \leq -5^{\circ}$ C) pour chaque hiver depuis 1955 à Rostrenen. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1955 s'étend d'octobre 1954 à avril 1955.

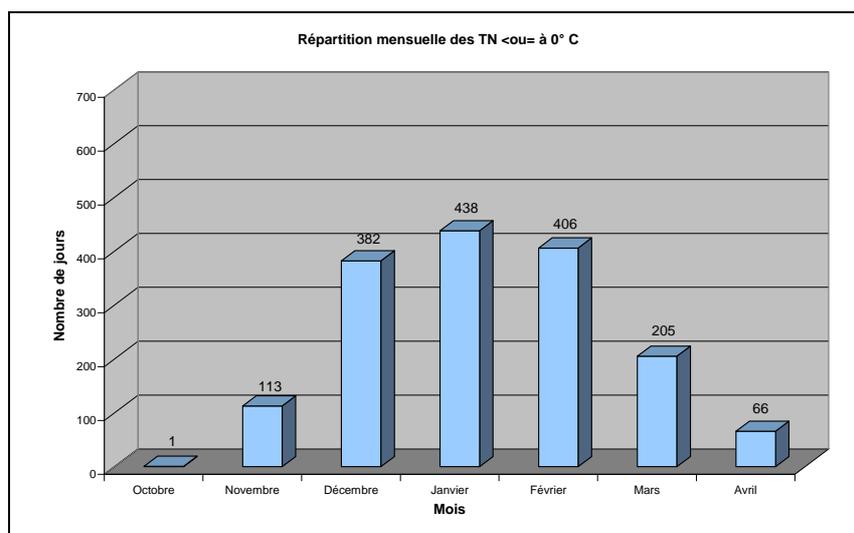
L'hiver 1963 comporte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0° C (67 dates). L'hiver 1963 compte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à -5° C (24 dates).

L'hiver 1995 fut le plus doux avec 9 jours avec des TN inférieures ou égales à 0° C et aucune TN inférieure ou égale à -5° C.

La **normale sur 30 ans** (1971-2000) du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0° C est de **27,2 jours par hiver** et avec une TN inférieure ou égale à -5° C de **2,4 jours par hiver**.

Les hivers des dix dernières années de 2001 à 2010 présentent une moyenne de **28,9** journées où la TN est inférieure ou égale à 0° C, légèrement au-dessus de la normale et de **1,3** journée où la TN est inférieure ou égale à -5° C, au-dessous de la normale.

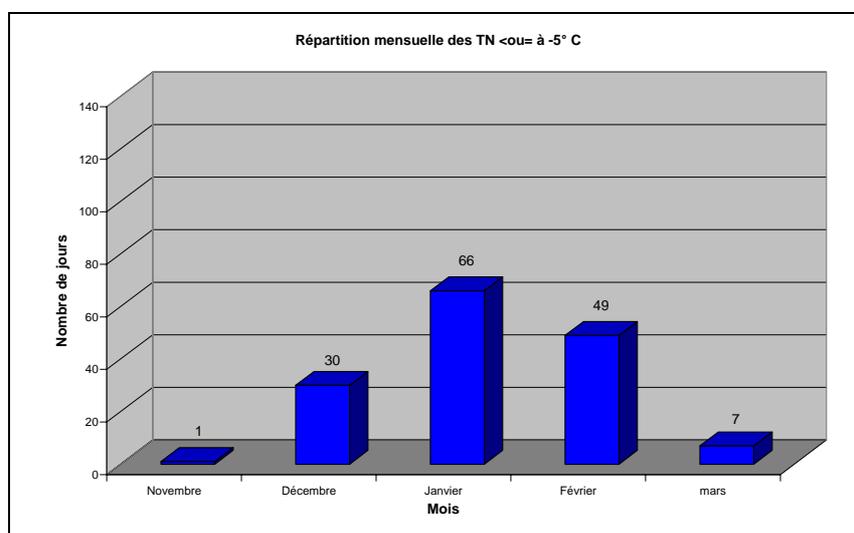
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graph 1.11 : répartition mensuelle des $TN \leq 0^{\circ}C$ à Rostrenen pour 56 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à $0^{\circ}C$ pour les hivers de 1956 à 2011 pour la station de Rostrenen. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **76 %** des 1 611 journées où des TN inférieures ou égales à $0^{\circ}C$ sont observées.

La température minimale relevée à Rostrenen date du 20 janvier 1963 avec $-13,9^{\circ}C$.



Graph 1.12 : répartition mensuelle des $TN \leq -5^{\circ}C$ à Rostrenen pour 56 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à $-5^{\circ}C$ pour les hivers de 1956 à 2011 pour Rostrenen. Les mois de **janvier** et **février** représentent **75 %** des 153 journées où la TN est inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$. Les mois de novembre et de mars connaissent peu de jours avec une TN inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$. Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$ en octobre et avril.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
1 611	931	160

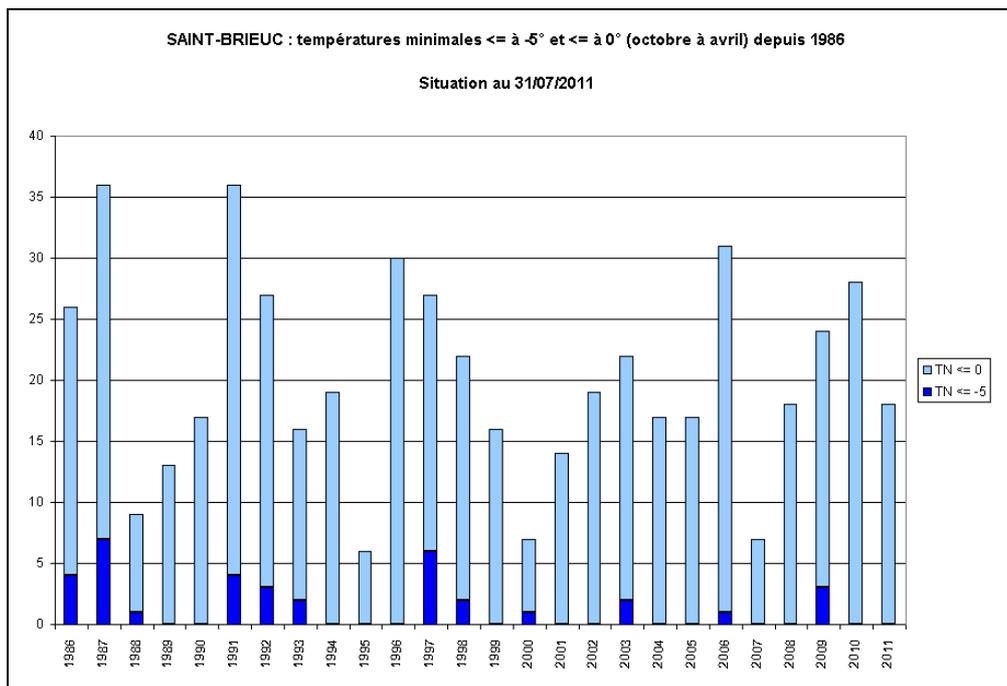
Tableau 1.4 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Rostrenen

Le tableau 1.4 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

1.2.5. Saint-Brieuc

Les données utilisées proviennent de la station de Trémuson, commune sur laquelle est implanté l'aéroport de Saint-Brieuc.

Les données disponibles pour cette station sont moins nombreuses. Le début des mesures commencent à l'hiver 1985/1986. Les comparaisons avec la normale ne sont pas possibles, la période 1986/2011 est trop restreinte.



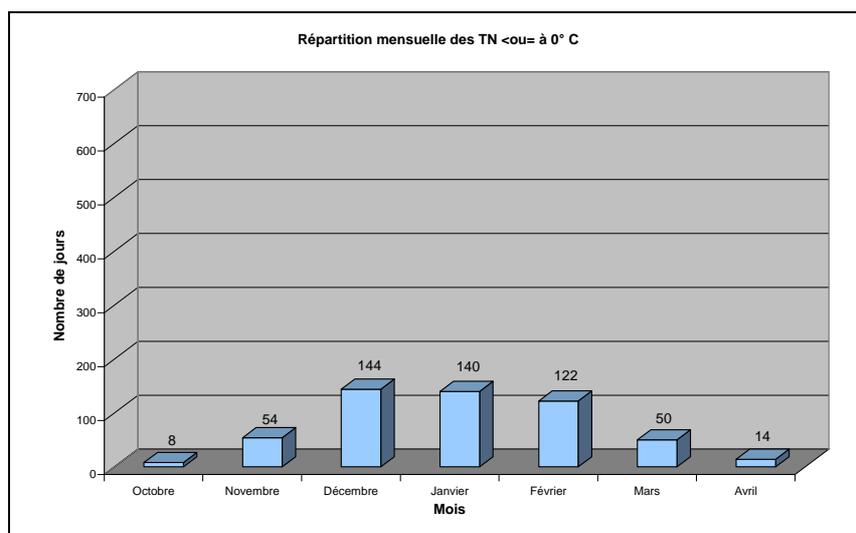
Graphie 1.13 : températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ et -5°C entre octobre et avril depuis l'hiver 1986

Ce graphique présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0°C (couleur bleu clair : exemple hiver 1996, 20 jours avec une TN 0°C) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5°C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1986, 4 jours avec une TN $\leq -5^{\circ}\text{C}$) pour chaque hiver depuis 1986 à Saint-Brieuc. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1986 s'étend d'octobre 1985 à avril 1986.

Les hivers 1987 et 1991 comportent le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C (36 dates). L'hiver 1983 compte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à -5°C (7 dates).

L'hiver 1995 fut le plus doux avec 6 jours avec des TN inférieures ou égales à 0°C et aucune TN inférieure ou égale à -5°C .

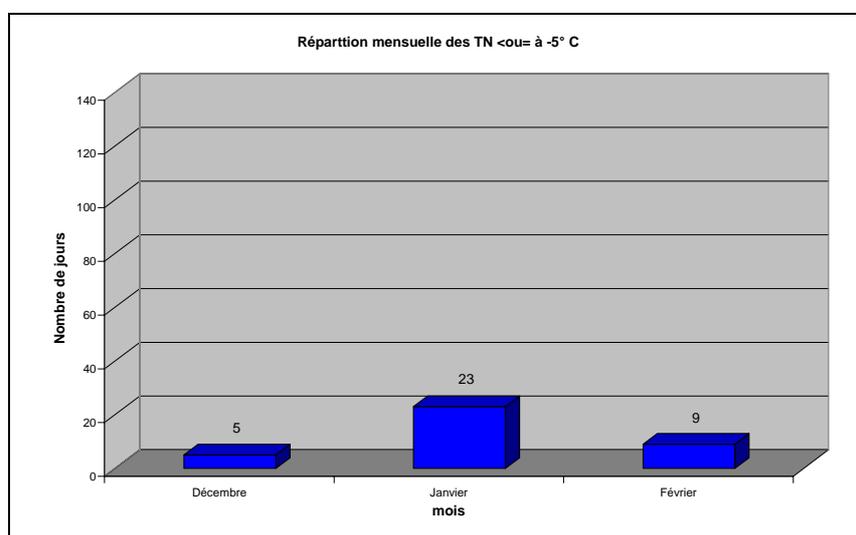
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graphie 1.14 : répartition mensuelle des $TN \leq 0^{\circ}C$ à Saint-Brieuc pour 26 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à $0^{\circ}C$ pour les hivers de 1986 à 2011 pour la station de Saint-Brieuc. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **76 %** des 532 journées où des TN inférieures ou égales à $0^{\circ}C$ sont observées.

La température minimale relevée à Saint-Brieuc date du 12 janvier 1987 avec $-11,3^{\circ}C$ **pour la période de l'hiver 1986 à l'hiver 2011**.



Graphie 1.15 : répartition mensuelle des $TN \leq -5^{\circ}C$ à Saint-Brieuc pour 26 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à $-5^{\circ}C$ pour les hivers de 1986 à 2011 pour Saint-Brieuc. Le mois de **janvier** représente **62 %** des 37 journées où la TN est inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$. Les mois de décembre et février connaissent peu de jours avec une TN inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$. Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à $-5^{\circ}C$ en octobre, novembre, mars et avril pour la période 1986 à 2011.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

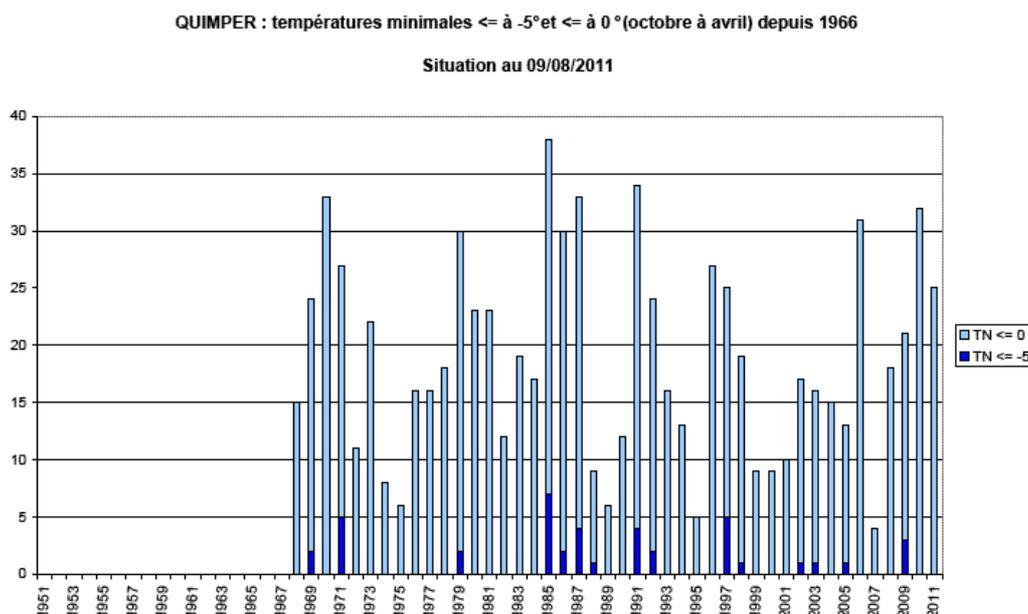
Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
533	284	38

*Tableau 1.5 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Saint-Brieuc*

Le tableau 1.5 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

1.2.6. Quimper

Les données utilisées proviennent de la station de Pluguffan, commune sur laquelle est implanté l'aéroport de Quimper.



Graphe 1.16 : températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ et -5°C entre octobre et avril depuis l'hiver 1966

Ce graphe présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0°C (couleur bleu clair : exemple hiver 1968, 15 jours avec une TN 0°C) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5°C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1997, 5 jours avec une TN $\leq -5^{\circ}\text{C}$) pour chaque hiver depuis 1966 à Quimper. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1986 s'étend d'octobre 1985 à avril 1986.

L'hiver 1985 comporte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C (38 dates). L'hiver 1985 compte également le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à -5°C (7 dates).

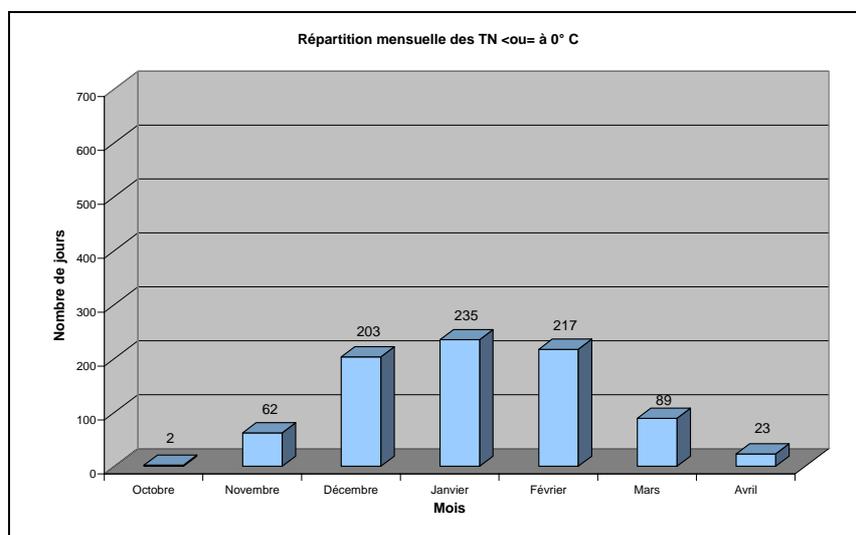
Les hivers 1966 et 1967 furent les plus doux avec aucune TN inférieure ou égale à 0°C .

L'hiver 2007 fut doux avec seulement 4 jours avec des TN inférieures ou égales à 0°C et aucune TN inférieure ou égale à -5°C .

La **normale sur 30 ans** (1971-2000) du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C est de **18,4 jours par hiver** et avec une TN inférieure ou égale à -5°C de **1 jour par hiver**.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

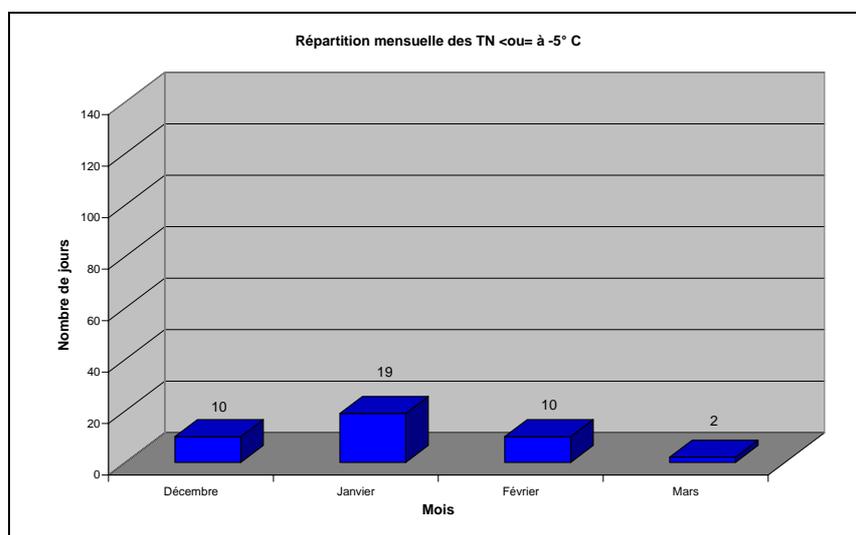
Les hivers des dix dernières années de 2001 à 2010 présentent une moyenne de **19,0** journées où la TN est inférieure ou égale à 0 °C, légèrement au-dessus de la normale et de **0,6** journée où la TN est inférieure ou égale à – 5 °C, au-dessous de la normale.



Graphie 1.17 : répartition mensuelle des TN ≤ 0 °C à Quimper pour 44 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à 0 °C pour les hivers de 1968 à 2011 pour la station de Quimper. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **79 %** des 831 journées où des TN inférieures ou égales à 0 °C sont observées.

La température minimale relevée à Quimper date du 13 janvier 1987 avec – 10,1 °C **pour la période de l'hiver 1968 à l'hiver 2011**.



Graphie 1.18 : répartition mensuelle des TN ≤ -5 °C à Quimper pour 44 périodes hivernales

Ce graphique montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à – 5 °C pour les hivers de 1986 à 2011 pour Quimper. Le mois de **janvier** représente **62 %** des 37 journées où la TN est inférieure ou égale à – 5 °C. Les mois de décembre et février connaissent peu de jours avec une TN inférieure ou égale à – 5 °C. Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à – 5 °C en octobre, novembre, mars et avril pour la période 1986 à 2011.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

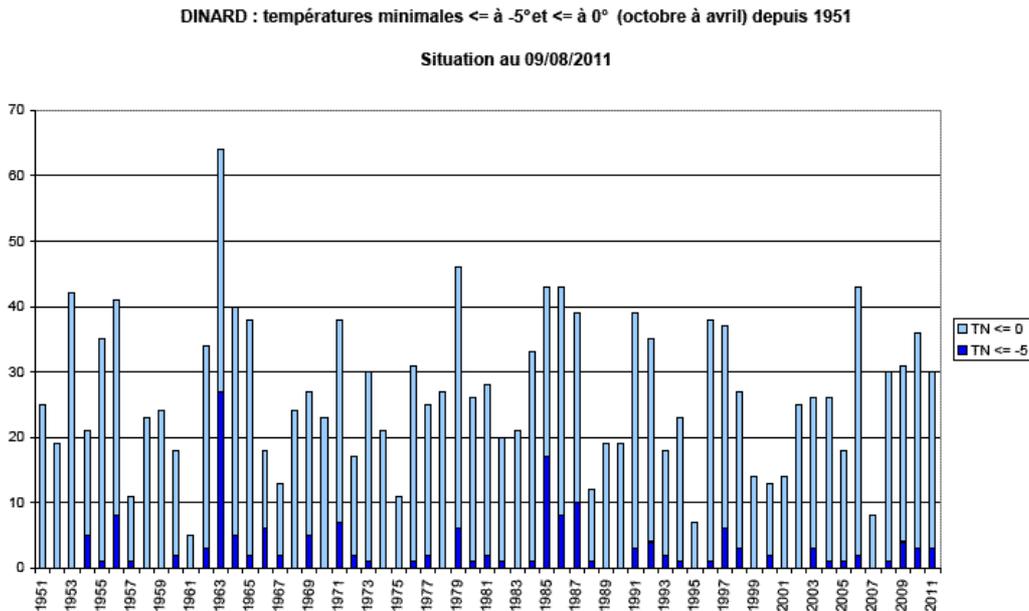
Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
831	280	22

*Tableau 1.6 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Quimper*

Le tableau 1.6 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

1.2.7. Dinard

Les données utilisées proviennent de la station de Pleurtuit, commune sur laquelle est implanté l'aéroport de Dinard.



Graphie 1.19 : températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ et -5°C entre octobre et avril depuis l'hiver 1951

Ce graphe présente le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0°C (couleur bleu clair : exemple hiver 1964, 40 jours avec une TN 0°C) et le nombre de jours où la température minimale relevée est inférieure ou égale à -5°C (couleur bleu foncé : exemple hiver 1987, 10 jours avec une TN $\leq -5^{\circ}\text{C}$) pour chaque hiver depuis 1951 à Dinard. L'hiver comprend les mois d'octobre à avril : exemple l'hiver de l'année 1986 s'étend d'octobre 1985 à avril 1986.

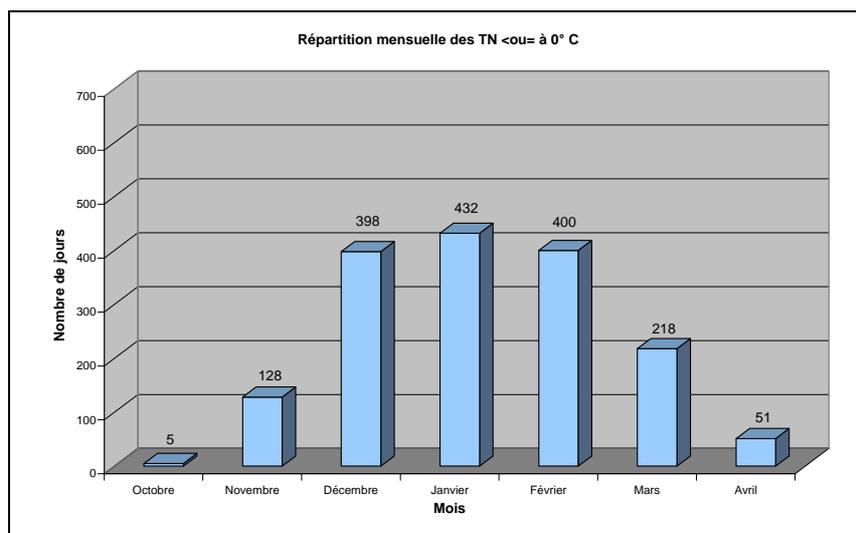
L'hiver 1963 comporte le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C (64 dates). L'hiver 1963 compte également le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à -5°C (27 dates).

L'hiver 1961 fut le plus doux avec 5 jours avec des TN inférieures ou égales à 0°C et aucune TN inférieure ou égale à -5°C .

La **normale sur 30 ans** (1971-2000) du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0°C est de **26,4 jours par hiver** et avec une TN inférieure ou égale à -5°C de **2,6 jours par hiver**.

Les hivers des dix dernières années de 2001 à 2010 présentent une moyenne de **27,2** journées où la TN est inférieure ou égale à 0°C , au-dessus de la normale et de **1,8** journée où la TN est inférieure ou égale à -5°C , au-dessous de la normale.

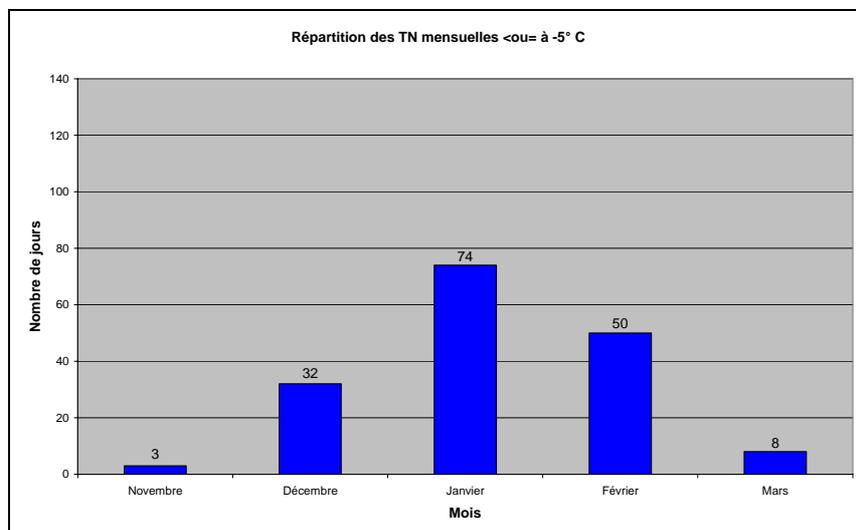
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graph 1.17 : répartition mensuelle des TN $\leq 0^{\circ}\text{C}$ à Dinard pour 61 périodes hivernales

Ce graphe montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à 0°C pour les hivers de 1951 à 2011 pour la station de Dinard. Les mois de **décembre**, **janvier** et **février** représentent **75 %** des 1 632 journées où des TN inférieures ou égales à 0°C sont observées.

La température minimale relevée à Dinard date du 20 janvier 1963 avec $-13,7^{\circ}\text{C}$ **pour la période de l'hiver 1951 à l'hiver 2011.**



Graph 1.18 : répartition mensuelle des TN $\leq -5^{\circ}\text{C}$ à Dinard pour 61 périodes hivernales

Ce graphe montre la répartition mensuelle des TN inférieures ou égales à -5°C pour les hivers de 1968 à 2011 pour Quimper. Les mois de **janvier** et **février** représentent **74 %** des 167 journées où la TN est inférieure ou égale à -5°C , avec le mois de décembre le pourcentage atteint **93 %**. Les mois de novembre et mars connaissent peu de jours avec une TN inférieure ou égale à -5°C . Il n'est pas observé de TN inférieure ou égale à -5°C en octobre et avril pour la période 1968 à 2011.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

Nombre de journées $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Nombre de journées $TX \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
1 632	697	101

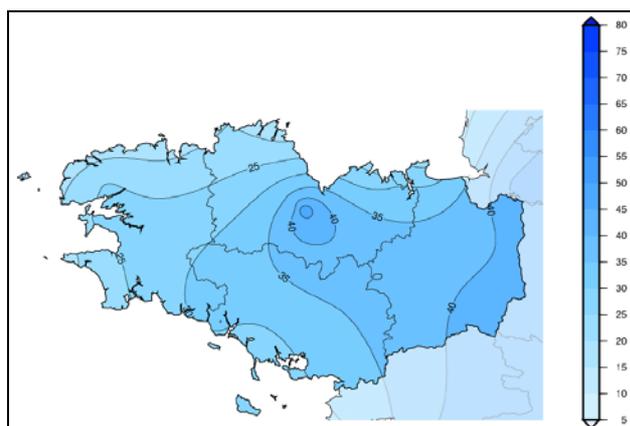
*Tableau 1.7 : répartition du nombre de jours où pour une $TN \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$
les TX sont $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'une part et $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ d'autre part à Dinard*

Le tableau 1.7 indique le nombre de jours où la **température maximale** reste inférieure ou égale à +5 et 0 °C lorsque la température minimale relevée est inférieure ou égale à 0 °C.

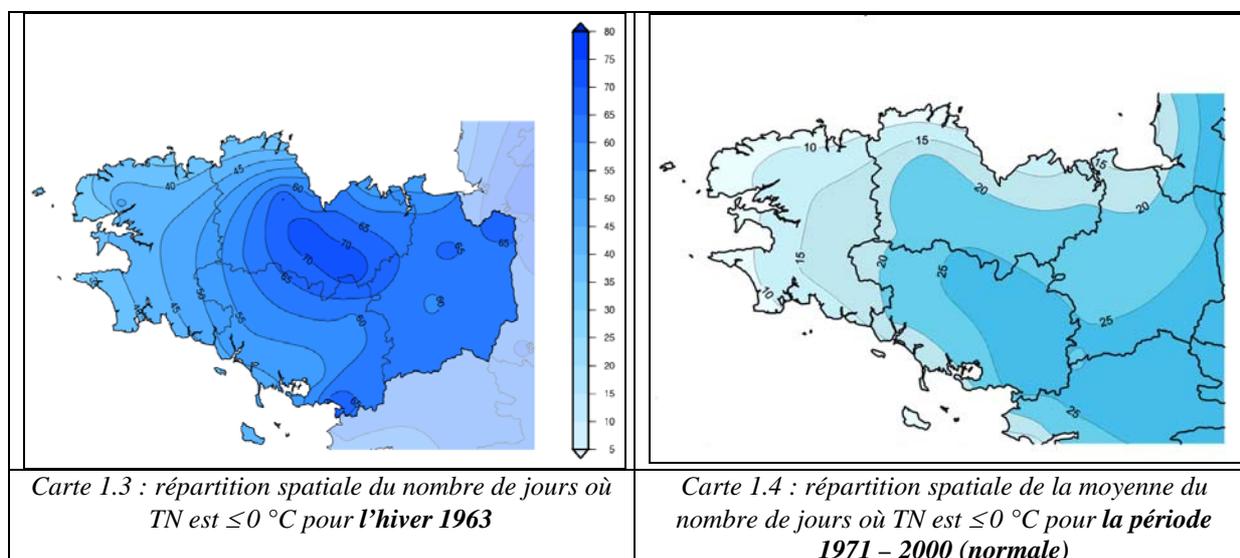
1.3. Variation spatiale

Les cartes ci-dessous proposent la répartition spatiale du nombre de jours où la TN est inférieure ou égale à 0 °C sur la Bretagne. Ce nombre de jours est calculé pour les mois de décembre, janvier et février.

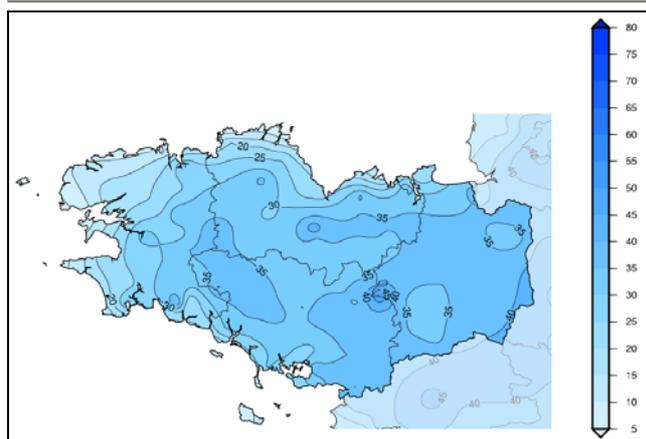
1.3.1. Hiver « froids » 1956, 1963 et 2006



Carte 1.2 : répartition spatiale du nombre de jours où TN est ≤ 0 °C pour l'hiver 1956



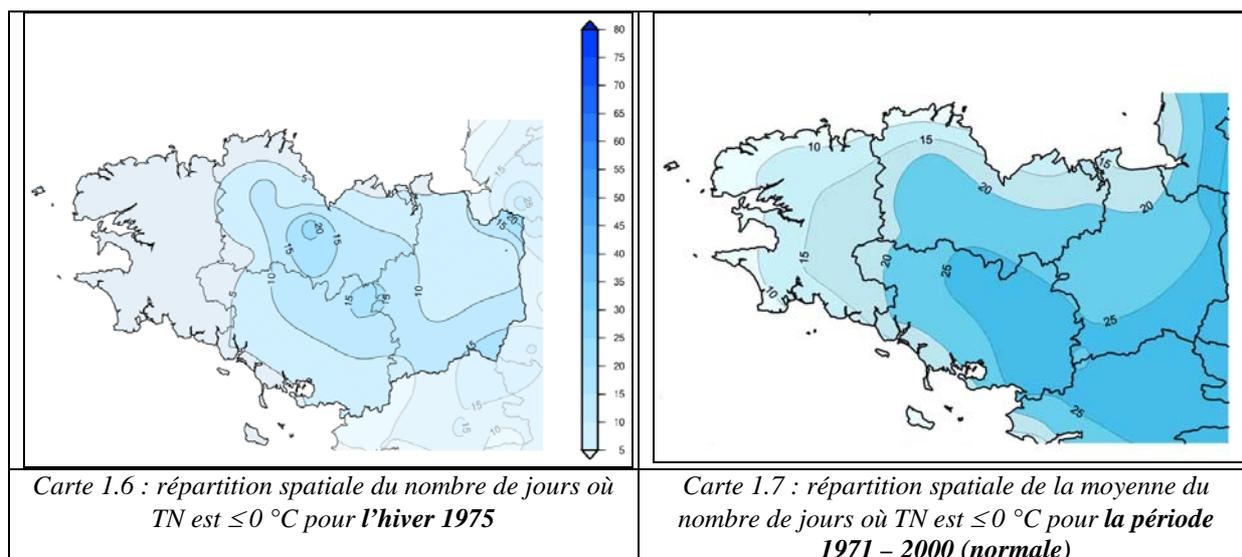
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Carte 1.5 : répartition spatiale du nombre de jours où TN est ≤ 0 °C pour l'hiver 2006

L'hiver 1963, pour les mois de **décembre**, **janvier** et **février**, a connu le plus grand nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0 °C.

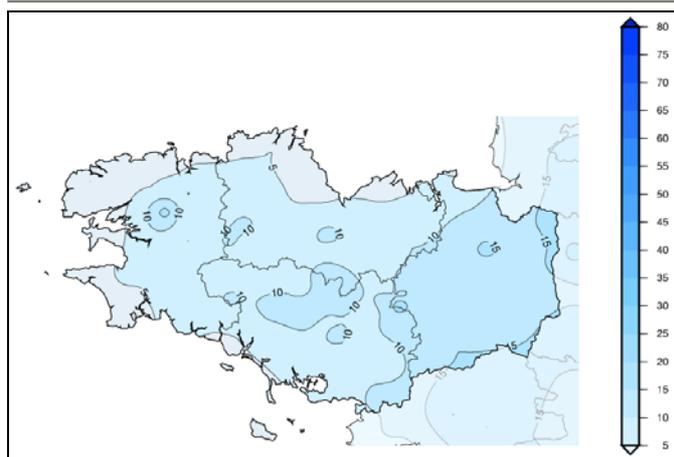
1.3.2. Hiver « doux » 1975, 1995 et 2007



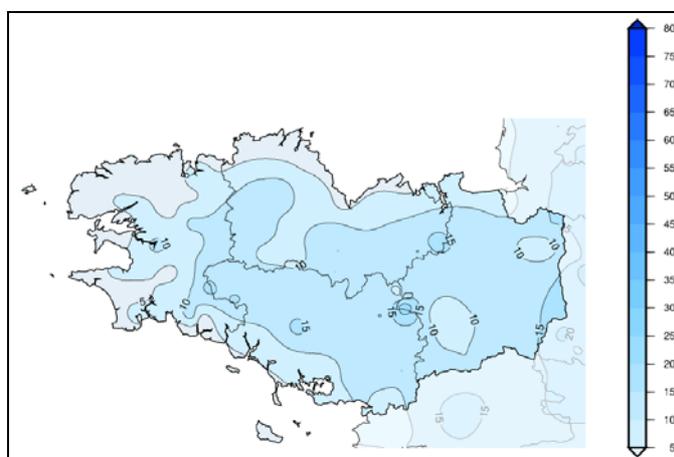
Carte 1.6 : répartition spatiale du nombre de jours où TN est ≤ 0 °C pour l'hiver 1975

Carte 1.7 : répartition spatiale de la moyenne du nombre de jours où TN est ≤ 0 °C pour la période 1971 – 2000 (normale)

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Carte 1.8 : répartition spatiale du nombre de jours où TN est ≤ 0 °C pour l'hiver 1995



Carte 1.9 : répartition spatiale du nombre de jours où TN est ≤ 0 °C pour l'hiver 2007

1.3.3. Commentaire

Pour les hivers « froids », (mois de **décembre**, **janvier** et **février**), le nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0 °C décroît de l'Ille et Vilaine vers le Finistère. Les hivers 1956 et 1963 présentent un noyau plus élevé sur le département des Côtes d'Armor. Sur le littoral, l'influence de la mer, avec une température toujours positive, atténue le nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0 °C.

La carte 4 représente la répartition spatiale de la moyenne du nombre de jours, par hiver, où TN est ≤ 0 °C sur la période 1971-2000 (normale).

Pour les hivers « doux », le nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0 °C dépasse rarement les 10 jours. L'hiver 1975 présente également un noyau élevé sur le département des Côtes d'Armor.

La carte 7 représente la répartition spatiale de la moyenne du nombre de jours, par hiver, où TN est ≤ 0 °C sur la période 1971-2000 (normale). Elle est identique à la carte 4.

1.4. Conclusion

Le mois le plus froid en Bretagne est le mois de **janvier** suivi par le mois de **février** et celui de **décembre**. Ces 3 mois concentrent la presque totalité des jours avec une température minimale inférieure ou égale à 0 °C.

Les températures les plus basses relevées, pour les différentes stations, se situent toutes au mois de **janvier**. L'amplitude entre ces différentes stations est faible : entre des stations plutôt dans les terres, comme Rennes ou Rostrenen, et des stations plus proches de la mer comme Lorient, Brest ou Dinard.

Pour la même période de données disponibles (1946-2011) Rennes observe plus du double de jours avec une TN inférieure ou égale à 0 °C qu'à Brest.

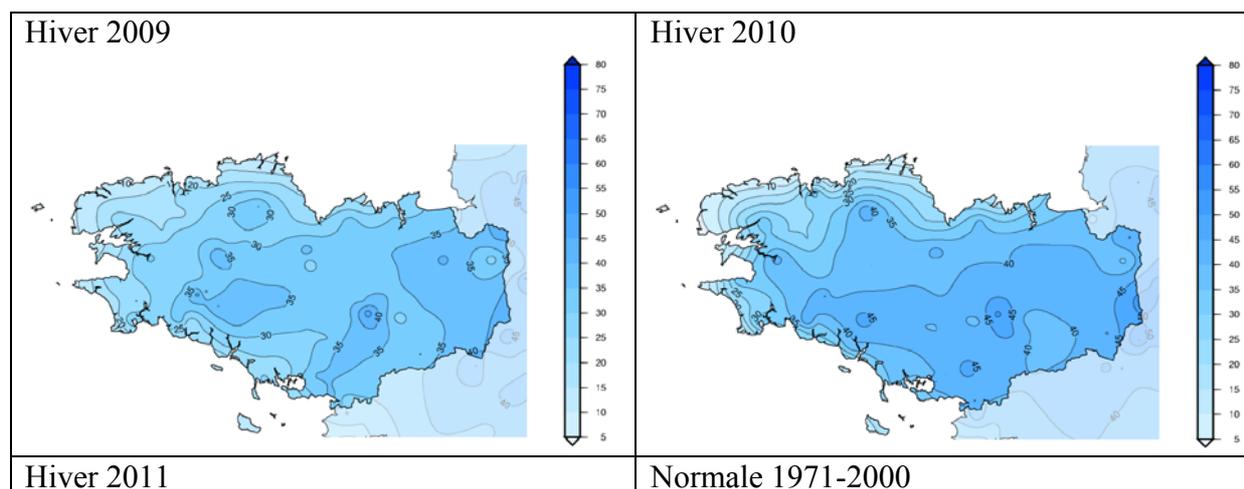
Durant la dernière décennie 2001-2010 la moyenne du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à 0 °C est légèrement supérieure à la moyenne sur 30 ans (normale) à l'exception de Lorient. La moyenne du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à - 5° C, par contre, est plutôt inférieure à la moyenne sur 30 ans (à l'exception de Brest et Lorient). Cette baisse sensible du nombre de jours avec une TN inférieure ou égale à - 5 °C **marque un léger réchauffement**.

Cette décennie est représentative :

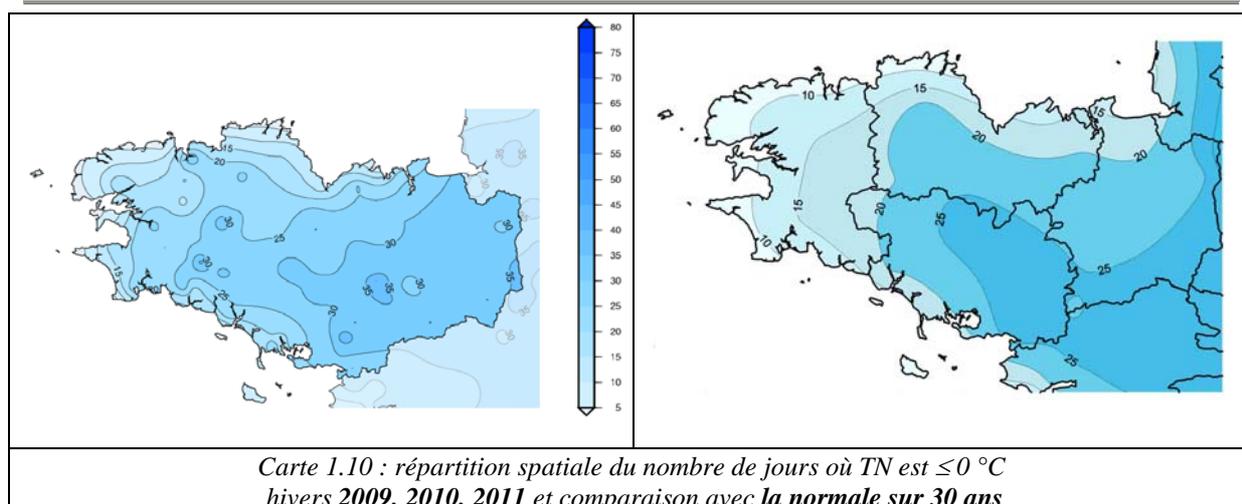
- de la variabilité climatique observée à nos latitudes.
- du climat actuel

Elle n'est pas très éloignée des valeurs observées sur la période 1971 - 2000.

Les 3 derniers hivers 2009, 2010 et 2010 ont connu un nombre de jours avec une TN ≤ 0 °C supérieur à la normale sur 30 ans (carte ci-dessous)



Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Le tableau ci-dessous synthétise les principales informations des différentes stations.

	Brest 1946-2011	Rennes 1946-2011	Dinard 1950-2011	Lorient 1953-2011	Rostrenen 1956-2011	Quimper 1967-2011	Saint-Brieuc 1987-2011
TN ≤ 0 °C	1 102 jours	2 530 jours	1 632 jours	1 686 jours	1 611 jours	831 jours	533 jours
TN $\leq - 5$ °C	66 jours	282 jours	167 jours	120 jours	154 jours	41 jours	37 jours
TN la plus basse	28/01/1947 -14 °C	17/01/1985 -14,7 °C	20/01/1963 -13,7 °C	20/01/1963 -13,1 °C	20/01/1963 -13,9 °C	13/01/1987 -10,1 °C	12/01/1987 -11,3 °C
TX $\leq + 5$ °C	441	920	697	480	931	280	284
TX ≤ 0 °C	29	142	101	60	160	22	38
Normale TN ≤ 0 °C Moyenne 2001-2010	13,6 20,2	34,5 36,1	26,4 27,2	28,2 27,9	27,2 28,9	18,4 19,0	Pas assez de données
Normale TN $\leq - 5$ °C Moyenne 2001-2010	0,6 0,7	2,8 3,2	2,6 1,8	1,4 1,2	2,4 1,3	1,0 0,6	Pas assez de données

Tableau 1. 8 : synthèse des principales informations des différentes villes

Ce tableau se lit par colonne : exemple Brest 1946-2011 (soit 66 périodes hivernales). Sur cette période il est relevé 1 102 jours avec une TN ≤ 0 °C, 66 jours avec une TN $\leq - 5$ °C. La température la plus basse observée est $- 14$ °C le 28/01/1947. Sur les 1 102 dates où la TN est ≤ 0 °C, il y en a 441 où la TX n'a pas dépassée 5 °C et pour 29 dates la TX n'a pas dépassé 0 °C. Les deux dernières lignes comparent la moyenne du nombre de jours, par période hivernale, avec une TN ≤ 0 °C et une TN $\leq - 5$ °C, sur 30 ans (Normale 1971 – 2000) et 10 ans (2001-2010) : sur **30 ans** il est observé une moyenne de **13,6** jours avec une TN ≤ 0 °C et de **20,2** jours sur **10 ans**.

Partie 2. Climatologie à partir des données horaires

2.1. Objectifs et données utilisées

2.1.1. Objectifs

La partie 1 précédente porte sur la climatologie générale des périodes de froid en Bretagne ; pour cela, les historiques complets (les plus longs possible, soit plusieurs dizaines d'années) des séries de températures quotidiennes, minimales (T_n) et maximales (T_x), de sept stations météorologiques de la région Bretagne sont exploités.

L'objectif de la partie 2 est de cibler plus particulièrement les périodes de grand froid observées susceptibles de provoquer, en lien avec le chauffage électrique, des pics de consommation électrique, le matin entre 6 et 9 UTC et le soir entre 18 et 21 UTC. Dans un premier temps, 100 à 200 dates pouvant être considérées comme des situations météorologiques typiques des épisodes de grand froid sur la Bretagne qui appellent une forte consommation électrique sur les créneaux horaires du matin ou du soir sont identifiées. Dans la suite de l'étude (partie n°2), le vent prévu par le modèle atmosphérique ALADIN pour chacune de ces dates représentatives permettra de proposer une modélisation sous forme cartographiée du potentiel éolien breton par grand froid. La sélection est réalisée au moyen de méthodes statistiques ; puis, elle est finalisée grâce aux données mises à disposition par le Conseil Régional de Bretagne (liste des jours mis en alerte du dispositif "écowatt" lors des saisons hivernales 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 par exemple).

Dans un second temps, une étude descriptive et statistique de l'échantillon obtenu est effectuée. Cela permet d'affiner, ou de compléter, la climatologie générale de la partie 1.

2.1.2. Données utilisées

Les sept stations retenues dans la partie 1 sont à nouveau choisies : Brest (station à Guipavas), Lorient (station à Lann-Bihoué), Rennes (station à St-Jacques-de-la-Lande), Quimper (station à Pluguffan), St-Brieuc (station à Trémuson), Dinard (station à Pleurtuit) et Rostrenen.

Pour cibler les deux créneaux horaires spécifiques du matin et du soir, les températures minimales horaires de la table horaire de la base de données climatologiques de Météo-France sont étudiées aux réseaux de mesure de 6, 7, 8 et 9 UTC pour le pic de consommation du matin et aux réseaux de 18, 19, 20 et 21 UTC pour le pic de consommation du soir (il s'agit de la température minimale observée dans l'heure précédente). Pour chaque créneau et chaque station, le niveau de fraîcheur est caractérisé par le minimum des 4 températures minimales horaires ; par la suite, ce minimum de température est appelé "température minimale par créneau" et est noté T_{mini} .

La profondeur de l'archive du modèle ALADIN n'ayant que 10 ans, pour pouvoir utiliser dans la suite de l'étude les vents modélisés, la période de recherche de l'échantillon des 100 à 200 situations de grand froid est restreinte aux dix dernières années : du 01/01/2001 au 31/12/2010.

Dans la climatologie générale, il a été vu que, pour les 7 stations étudiées, les mois d'octobre et d'avril n'étaient pas concernés par des températures inférieures à -5 °C et à peine par des températures inférieures ou égales à 0 °C . Pour déterminer un échantillon de situations typiques de grand froid produisant une surconsommation d'électricité, la recherche est restreinte à la période de l'année la plus propice : de novembre à mars.

Enfin, un arbitrage méthodologique a été convenu avec le Conseil Régional de Bretagne pour s'affranchir d'une différenciation entre les jours travaillés en semaine, les samedis, les dimanches, les jours fériés ou les vacances scolaires.

Les 100 à 200 situations de grand froid en Bretagne sont donc recherchées parmi 3 024 créneaux horaires du matin ou du soir ($2_{\text{créneaux par jour}} \times [8_{\text{ans}} \times 151_{\text{jours}} + 2_{\text{ans}} \times 152_{\text{jours}}]$).

2.2. Détermination de 100 à 200 dates de grand froid

2.2.1. Méthode générale

Dans un premier temps, les 3 024 créneaux disponibles sont classés au moyen de méthodes statistiques en fonction des valeurs des "températures minimales par créneau" des sept stations retenues pour l'étude. Une première sélection purement météorologique des dates les plus froides peut ainsi être réalisée.

Dans un second temps, pour tenir compte de l'aspect "consommation électrique totale régionale" en période de grand froid, il convient de faire intervenir la population effectivement impactée par le froid. A cette fin, il est introduit un indicateur thermique régional défini comme la moyenne des "températures minimales par créneau" de chaque station pondérées par la population de la zone géographique d'influence en termes de température minimale de la station.

Une étude statistique de la distribution de cet indicateur thermique régional permet de déterminer les 100 à 200 dates les plus froides appelant une forte consommation électrique concentrée sur les créneaux horaires du matin ou du soir.

2.2.2. Pondération par la population dans le calcul d'un indicatif thermique régional

Dans un premier temps, il s'agit de définir la zone d'influence climatique de chaque station retenue, l'accent étant plus spécifiquement mis sur les températures minimales.

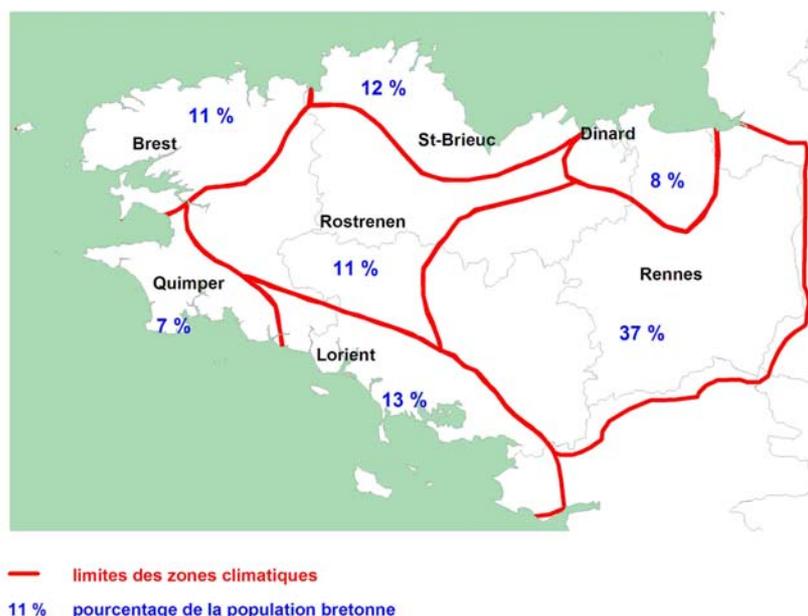
A cette fin, une étude simultanée de plusieurs paramètres météorologiques thermiques disponibles dans les tables de la base de données climatologiques de Météo-France et qui décrivent les températures minimales de ces dix dernières années, en particulier les températures les plus basses qui ont pu être observées, est réalisée. La détermination de la zone d'influence de chacune des 7 villes en termes de température minimale (tracé en rouge sur la carte 2.1) est graphique.

Ces paramètres thermiques sont les suivants :

- les températures minimales moyennes sur les dix dernières années pour un mois de novembre, un mois de décembre, un mois de janvier, un mois de février et un mois de mars ;
- les moyennes sur les dix dernières années des nombres de jours avec une température minimale quotidienne inférieure à 0 °C entre novembre et mars d'une part et entre décembre et février d'autre part ;
- les moyennes sur les dix dernières années des nombres de jours avec une température minimale quotidienne inférieure à -5 °C entre novembre et mars d'une part et entre décembre et février d'autre part ;
- la température la plus basse observée chaque mois entre novembre et mars chacune de ces dix dernières années.

Dans un second temps, les données INSEE issues du recensement de la population française réalisé en 2007 permettent d'attribuer le pourcentage approximatif (méthode graphique) de la population bretonne que représente chaque zone (pointage en bleu sur la carte 2.1).

Pourcentage de la population bretonne associé à chaque zone climatique



Carte 2.1 : zones d'influence de chacune des 7 stations en termes de température minimale (en rouge)
Pourcentage de la population bretonne que représente chaque zone (en bleu)

Ainsi, dans le calcul de l'indicateur thermique régional, le poids appliqué à la température observée à Rennes est beaucoup plus important que les poids appliqués aux températures observées dans les six autres stations bretonnes retenues pour l'étude.

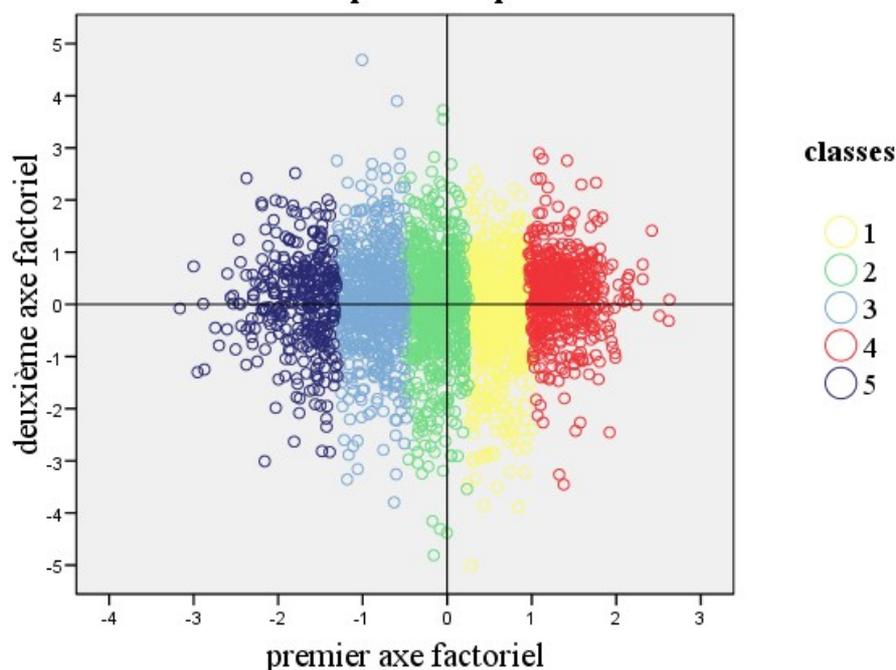
2.2.3. Echantillonnage de dates typiques de grand froid en Bretagne

2.2.3.1. Résultats de la classification en fonction des "températures minimales par créneau"

Une méthode mixant les méthodes statistiques de classification "k-means" et "classification hiérarchique ascendante" et utilisant comme variables les "températures minimales par créneau" de chaque station (sans normalisation) permet de regrouper les 3 024 créneaux disponibles dans cinq classes distinctes. Chaque classe correspond à un niveau de fraîcheur différent comme le montrent le graphique 2.1 et le tableau suivant :

- le graphique 2.1 présente la projection du nuage que constituent les 3 024 créneaux sur le premier plan factoriel (plan de maximum d'inertie). Le premier axe factoriel, axe des abscisses, est fortement corrélé aux sept "températures minimales par créneau" et peut être considéré comme une synthèse de ces sept températures (créneaux les plus froids vers la gauche et créneaux les plus chauds vers la droite) ;
- le tableau fournit les moyennes, pour chaque classe, des "températures minimales par créneau" de chacune des sept stations.

Projection du nuage composé des créneaux sur le premier plan factoriel



Graph 2.1 : projection des classes sur le premier plan factoriel

Classe	Tmini Rennes	Tmini Brest	Tmini St- Brieuc	Tmini Quimper	Tmini Lorient	Tmini Dinard	Tmini Rostrenen
1	7,8	8,5	7,7	8,6	8,6	7,9	6,9
2	4,7	5,8	5	5,8	5,4	5,3	4,2
3	1,5	2,9	2,4	2,8	2,1	2,4	1,4
4	11,3	11,1	10,9	11,3	11,4	11,3	10
5	-2,4	-0,4	-0,7	-0,7	-1,4	-1,2	-1,8

nuage total	5,3	6,2	5,6	6,2	5,9	5,8	4,8
----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tableau 2.1 : moyennes par classe des températures minimales par créneau de chaque station, en °C

- Caractéristiques de la cinquième classe :
 - ✓ pour tous les créneaux de la cinquième classe, l'une au moins des sept "températures minimales par créneau" est négative ; c'est la seule des cinq classes à présenter cette propriété ;
 - ✓ tous les créneaux avec 5 et plus (sur 7) "températures minimales par créneau" négatives sont regroupés dans cette unique classe. Ces créneaux représentent à eux seuls 68 % de l'effectif de la classe.

- Compléments comparatifs sur les quatre autres classes :
 - ✓ classes 1 et 4 : pour tous les créneaux, les 7 Tmini sont strictement positives ;
 - ✓ classe 2 : sauf dans 4 cas, les 7 Tmini sont strictement positives. Pour les 4 cas exclus, seule la "température minimale par créneau" de la station de Rennes est légèrement négative (minimum à -0,9 °C) ;
 - ✓ classe 3 : sauf dans 5 cas, au plus 3 Tmini sont négatives (avec une majorité de créneaux pour lesquels tous les Tmini sont strictement positives, 64 %). Pour les 5 cas exclus, 4 des Tmini sont négatives (au minimum -1,4 °C).

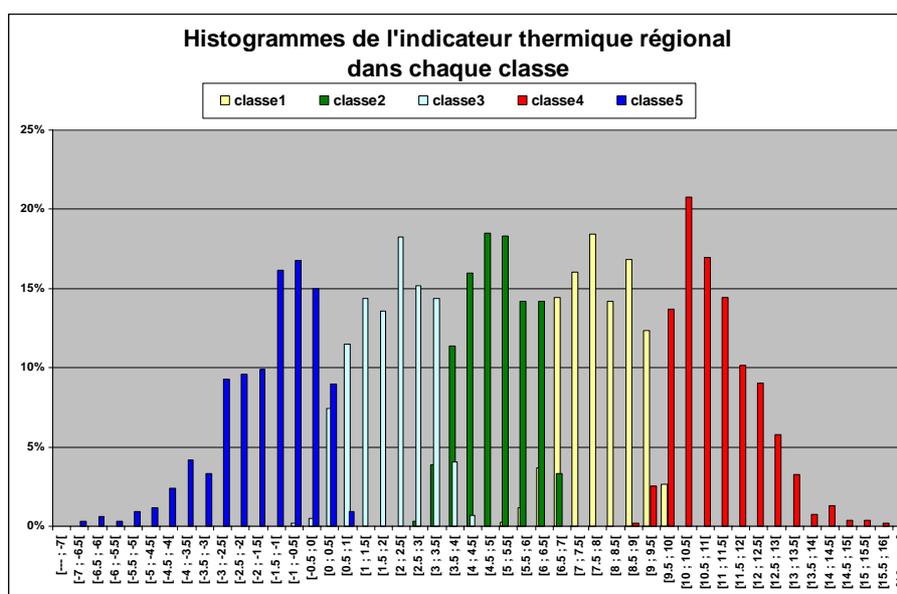
La cinquième classe permet une première sélection de 334 créneaux parmi les plus froids en Bretagne ces dix dernières années.

2.2.3.2. Echantillonnage à partir d'un indicateur thermique régional

Un indicateur thermique régional est introduit à ce niveau. Pour chaque créneau, cet indicateur est défini comme **la moyenne pondérée des "températures minimales par créneau" des sept stations retenues pour l'étude. Le poids appliqué** à la température de chaque station correspond à la **proportion de la population bretonne** que représente la station en termes de température minimale. Il s'exprime en degrés Celsius.

Même si cette unité est d'un usage courant, l'indicateur thermique régional regroupe plusieurs notions (température et population), le tout synthétisé sur une région entière, il convient donc d'étudier un peu son comportement.

La classification précédente réalisée et décrite à partir de températures "classiques" est utilisée : le graphique suivant représente l'histogramme de l'indicateur thermique régional en fonction de la classe.



Graphie 2.2 : histogrammes de l'indicateur thermique régional selon la classe

Sur les 10 années étudiées, l'indicateur thermique régional varie entre -7,1 °C et +16,1 °C ; sa moyenne est de 5,5 °C.

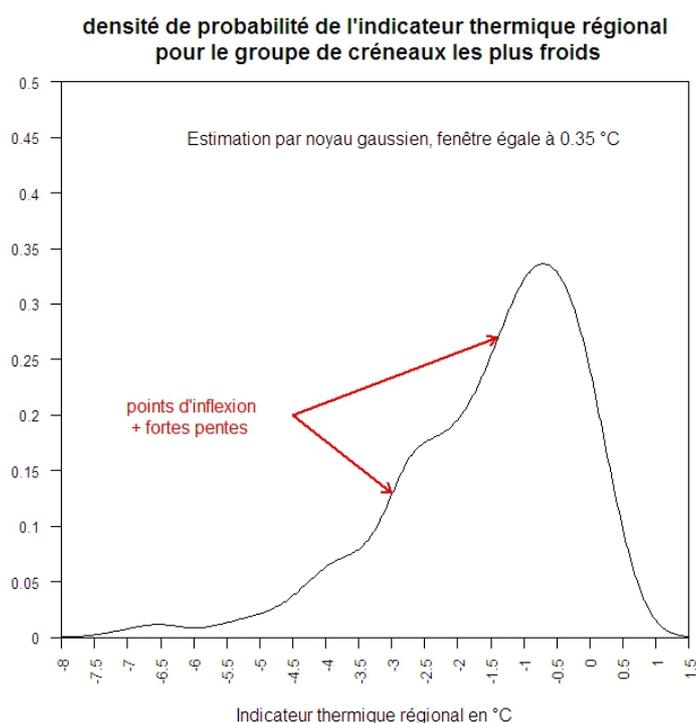
L'indicateur thermique régional discrimine bien les cinq classes (visuellement peu de chevauchements et rapport de corrélation significatif très élevé avec 93 % de la variance de l'indicateur expliqués par la classe).

Comme prévisible et souhaité, mais il fallait le vérifier, il apparaît bien que les valeurs les plus négatives de l'indicateur thermique régional correspondent aux créneaux horaires les plus froids (classe 5) et que plus la valeur de l'indicateur augmente plus le créneau associé est chaud.

Pour tenter de définir **un seuil pertinent en dessous duquel un créneau pourrait être retenu comme une situation de grand froid**, l'étude est focalisée sur la distribution de **l'indicateur thermique régional** dans la classe la plus froide (classe 5).

La méthode d'estimation par histogramme de la densité de probabilité de l'indicateur thermique régional utilisée ci-dessus fournit une estimation par construction non continue. Pour apprécier la densité de probabilité de l'indicateur dans la classe 5, l'estimation par noyau gaussien est appliquée : c'est une méthode non paramétrique qui permet d'estimer la densité en tout point du support ; elle généralise la méthode d'estimation par histogramme.

Le graphe 2.3 suivant présente le résultat de cette méthode d'estimation.



*Graphe 2.3 : densité de probabilité de l'indicateur thermique régional
pour le groupe de créneaux les plus froids*

La distribution est fortement asymétrique. A gauche du mode (valeur la plus fréquente), il apparaît deux ruptures nettes intéressantes qui correspondent aux deux points d'inflexion pour lesquels les pentes de la courbe sont les plus fortes ; les abscisses respectives de ces points sont -3 °C et -1,4 °C.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

- Créneaux pour lesquels l'indicateur thermique régional est strictement inférieur à -3 °C
 - ✓ au moins l'une des 7 Tmini utilisées dans le calcul de l'indicateur est inférieure ou égale à $-3,9\text{ °C}$, tandis qu'aucune ne dépasse $2,8\text{ °C}$;
 - ✓ jamais plus d'une des 7 Tmini n'est strictement positive (seulement 3 cas où une seule Tmini est strictement positive, sinon pour tous les autres cas les Tmini des 7 stations sont toutes négatives ou nulles).
- Créneaux pour lesquels l'indicateur thermique régional est strictement inférieur à $-1,4\text{ °C}$
 - ✓ au moins l'une des 7 Tmini est inférieure ou égale à -2 °C , tandis qu'aucune ne dépasse $3,8\text{ °C}$;
 - ✓ dans 70 % des cas, les 7 Tmini sont négatives ou nulles ; généralement dans les cas restants, 5 ou 6 des Tmini sont négatives ou nulles. Les exceptions sont au nombre de 6 : dans un seul cas, 2 Tmini uniquement sont négatives (il s'agit du 25/12/2009_soir, la station de Rennes est concernée avec $-5,2\text{ °C}$ ainsi que la station de Dinard avec $-2,6\text{ °C}$) et dans les 5 autres cas, 4 Tmini sont négatives ou nulles (Rennes est à chaque fois concernée et Lorient souvent). Pour ces exceptions, la zone fortement peuplée de Rennes est touchée, ce qui par l'intermédiaire de la pondération permet d'abaisser notablement la valeur de l'indicateur thermique régional en comparaison à la valeur qui serait obtenue avec une simple moyenne des Tmini.

Le seuil de -3 °C serait probablement le plus pertinent pour sélectionner les grands froids en Bretagne, mais 45 créneaux seulement ont effectivement un indicateur thermique régional strictement inférieur à -3 °C . En revanche, il en existe 149 pour lesquels l'indicateur est strictement inférieur $-1,4\text{ °C}$; comme vu ci-dessus, ce seuil permet quand même de sélectionner des froids assez importants pour la région Bretagne et, surtout, il permet également de diversifier les situations de grand froid. Par exemple, le 10/01/2009_soir correspond à une situation qui pourra être intéressante par la suite lors de la typologie des grands froids : en effet la région est coupée en deux avec des Tmini faiblement positives vers l'Ouest et le Nord-Ouest et négatives en allant vers le Sud-Est.

Le seuil de $-1,4\text{ °C}$ est donc choisi pour sélectionner un créneau horaire **comme représentatif d'une situation de grand froid** (149 cas).

Remarque : le seuil de -3 °C pourrait déterminer parmi ces "créneaux de grand froid" ceux qui correspondent à un "très grand froid" (45 cas).

2.2.3.3. Comparaison avec les dates alertes "écowatt"

Le Conseil Régional a mis à disposition l'historique des dates d'alerte "écowatt" pour les saisons hivernales 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 : 14 alertes orange et 13 alertes rouges (source : Document SAMDEN – DCEEB - Région Bretagne).

Attention cependant, les raisons pour lesquelles ces alertes ont été lancées ne nous ont pas été communiquées. Certaines d'entre elles ne correspondent pas à un épisode de grand froid avéré. Par exemple, ces dates peuvent être associées

- soit à la prévision d'une fragilité dans le circuit de production d'énergie totale sur la région Bretagne ou sur toute la France ;
- soit à des prévisions de températures trop pessimistes...

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Les dates d'alerte sont donc comparées à titre indicatif à la liste des dates appartenant à l'échantillon des situations de grand froid précédemment déterminé.

Le tableau suivant reprend les dates d'alerte orange et rouges (deux premières colonnes), les indicateurs thermiques régionaux du matin et du soir correspondant à chacune sont reportés en troisième et quatrième colonnes. Les dates dont l'un des créneaux est sélectionné comme une situation de grand froid apparaissent en bleu, de même le créneau (matin et/ou soir) classé en grand froid.

Couleur de l'alerte	Date d'alerte "écowatt"	IT régional matin	IT régional soir
	08/12/2008	-1.4	1.1
	09/12/2008	3.2	3.2
	11/12/2008	0.6	2.4
	05/01/2009	-0.6	1.4
	06/01/2009	-1.3	-2.9
	07/01/2009	-6.4	1
	08/01/2009	2.3	-1.4
	09/01/2009	-5.9	-3.6
	03/02/2009	-3.7	1.1
	14/12/2009	-2.1	-1
	15/12/2009	-3.1	-1.5
	16/12/2009	-4.4	-2.7
	17/12/2009	1	0.4
	18/12/2009	0.1	-3
	05/01/2010	-5.4	-0.9
	06/01/2010	-1.8	-0.8
	07/01/2010	-2.4	-2.2
	08/01/2010	-2.1	-1.6
	11/01/2010	-1.8	-1.7
	12/01/2010	-2	0.4
	29/11/2010	-4.9	-1.7
	30/11/2010	-3.8	-2
	01/12/2010	-4.5	-1.1
	02/12/2010	-3	-1.2
	03/12/2010	-1.9	-0.2
	14/12/2010	-3.5	2.6
	15/12/2010	-1.2	0.5

Tableau 2.2 : récapitulatif des dates d'alerte "écowatt" (orange et rouges) et des indices thermiques régionaux du matin et du soir associés

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

- 9 des 14 dates en alerte orange "écowatt" correspondent à une date de grand froid (dont 4 très grands froids), en particulier, le 12 janvier 2010 qui a correspondu à un pic record de consommation en Bretagne (source : "Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France 2011", RTE) ;
- 11 des 13 dates en alerte rouge "écowatt" correspondent à une date de grand froid (dont 7 très grands froids).

La majorité des dates en alerte "écowatt" se retrouvent bien classées en grand froid, ce qui est plutôt satisfaisant.

- Dates en alerte "écowatt" mais non sélectionnées dans l'échantillon des situations de grand froid

Elles sont au nombre de 7.

- ✓ Vu les indicateurs thermiques régionaux et les "températures minimales par créneau" des sept stations figurant dans le tableau suivant pour les situations du 09/12/2008, 11/12/2008 (alertes orange) et du 17/12/2009 (alerte rouge), il ne s'agit pas vraiment de situations de grand froid. L'explication de l'existence de telles alertes a été évoquée au début du paragraphe 2.2.3.3.

Date_ créneau	Tmini Rennes	Tmini Brest	Tmini St-Brieuc	Tmini Quimper	Tmini Lorient	Tmini Dinard	Tmini Rostrenen	IT régional
20081209_matin	0,9	6,5	5,8	5,6	3,4	2,8	3,6	3,2
20081209_soir	2,1	5,1	4,2	4,2	3,7	4,2	2,4	3,2
20081211_matin	-0,6	1,9	1,8	3,4	-0,2	0,1	1,4	0,6
20081211_soir	0,9	4	4,1	3,9	3,1	2,7	2	2,4
20091217_matin	-0,4	4,5	2,6	3,4	-1,5	2,1	0,9	1
20091217_soir	-1	2,7	1,9	1,9	0,3	2	-0,4	0,4

Tableau 2.3 : descriptif des dates d'alerte "écowatt" qui ne correspondent pas à un grand froid

- ✓ Il peut être considéré que les créneaux 08/12/2008_matin et 08/01/2009_soir, qui appartiennent bien à la classe la plus froide, classe 5, ont souffert de l'effet de seuil (arbitraire) de la condition "sélection si indicateur thermique régional STRICTEMENT inférieur à -4 °C" (dernière colonne du tableau suivant). Il ne s'agit pas de froid intense, mais quasiment toute la région est concernée. Dans le premier cas, le Finistère est plus froid que les autres départements, il s'agit là d'une situation peu fréquente (pas de cas actuellement dans l'échantillon) qui pourra être intéressante par la suite. Le second cas est un créneau du soir (actuellement 31 créneaux du soir pour 118 créneaux du matin), au cœur d'une période froide particulièrement longue (Cf. point "durée des épisodes" du paragraphe ultérieur 2.3.4.). Ces deux créneaux sont ajoutés à l'échantillon des situations de grand froid.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid

Date_ créneau	Tmini Rennes	Tmini Brest	Tmini St-Brieuc	Tmini Quimper	Tmini Lorient	Tmini Dinard	Tmini Rostrenen	IT régional
20081208_m atin	-1,8	-2,8	-0,5	-2,2	0,7	-2	-1	-1,37
20081208_ soir	0,7	4,2	1,4	2,3	0,1	0,3	0	1,08
20090108_m atin	2,6	2,6	2,2	2,7	1,7	2,9	1,3	2,32
20090108_ soir	-2,1	0,1	-0,6	-1	-1,5	-0,5	-2	-1,38

Tableau 2.4 : descriptif des dates d'alerte "écowatt" non sélectionnées en grand froid et qui pourraient l'être

- ✓ Les créneaux du matin du 05/01/2009 et du 15/12/2010 appartiennent à la classe 5 ; vu les "températures minimales par créneau" des sept stations, le créneau 20090105_matin ne correspond pas vraiment à une situation de grand froid. En revanche, l'éventualité d'intégrer le 15/12/2010 à l'échantillon de situations de grand froid en Bretagne peut être envisagée. En effet, la zone d'influence de Rennes, la plus peuplée, est particulièrement affectée (la température n'y repasse au-dessus de 0 °C que durant quelques heures l'après-midi). Cette situation ressemble à celle du créneau 15/12/2009_soir, quant à lui sélectionné car avec des températures globalement un peu plus froides. Il est intéressant car seules deux stations présentent des températures négatives, ce qui n'est pas fréquent dans l'actuel échantillon. Enfin, comme pour le 08/01/2009, la journée du 15/12/2010 s'inscrit dans une période globalement froide de ce mois de décembre 2010 (Cf. point "durée des épisodes" du paragraphe 2.3.4.).

Date_ créneau	Tmini Rennes	Tmini Brest	Tmini St-Brieuc	Tmini Quimper	Tmini Lorient	Tmini Dinard	Tmini Rostrenen	IT régional
20090105_m atin	-2,6	1,8	2,2	1,5	-2,7	1,3	0,6	-0,6
20090105_ soir	1,7	1,6	2,4	0,9	0,7	1,4	0,2	1,4
20101215_m atin	-4,9	3,6	0,9	1,5	1,4	-1,7	0	-1,2
20101215_ soir	-1,5	2,7	1,1	2,6	0,3	4,3	0,2	0,5

Tableau 2.5 : descriptif des dates d'alerte "écowatt" non sélectionnées restantes

Au final, l'échantillon de situations de grand froid en Bretagne ces dix dernières années contient 152 créneaux, répartis entre novembre et mars .

2.3. Etude statistique et descriptive de l'échantillon de "créneaux de grand froid"

Remarque préliminaire : l'étude qui suit ne porte que sur 10 ans, mais il a été vu dans la partie 1 que ces dix dernières années étaient représentatives des normales en ce qui concerne les grands froids.

2.3.1. "Températures minimales par créneau" dans les stations

Dans la grande majorité des cas, 67 %, les sept "températures minimales par créneaux" sont strictement inférieures à 0 °C. Lorsqu'une seule station affiche une "température minimale par créneau" supérieure ou égale à 0 °C (presque 20 % des cas), il s'agit le plus souvent de celle de Brest (vient ensuite celle de Dinard) ; ce n'est jamais celle de Rostrenen.

Fréquemment, la zone de la région la plus froide est située à l'Est ou au Sud-Est (Rennes et Dinard, Rennes et Lorient, Rennes Dinard et Lorient).

Dans trois cas seulement, elle est située sur le Nord-Ouest (Brest, St-Brieuc, Rostrenen) : les 16 décembre 2007, 2 février 2009 et 7 mars 2010.

Dans un seul cas, la zone la plus froide est située :

- à l'Ouest (Brest et Quimper), le 8 décembre 2008 ;
- au Nord (Brest, St-Brieuc et Dinard), le 31 décembre 2008 ;
- au Sud (Quimper et Lorient), le 7 janvier 2006.

Dans le tableau suivant, pour chaque station, figurent quelques statistiques des "températures minimales par créneau" de l'échantillon de situations de grand froid :

- ✓ valeurs minimale et maximale et les créneaux où elles se sont produites ;
- ✓ moyenne ;
- ✓ valeur Q_{10} , valeur en dessous de laquelle 10 % de l'échantillon sont situés ;
- ✓ valeur médiane, valeur en dessous de laquelle 50 % de l'échantillon sont situés ;
- ✓ valeur Q_{90} , valeur en dessous de laquelle 90 % de l'échantillon sont situés.

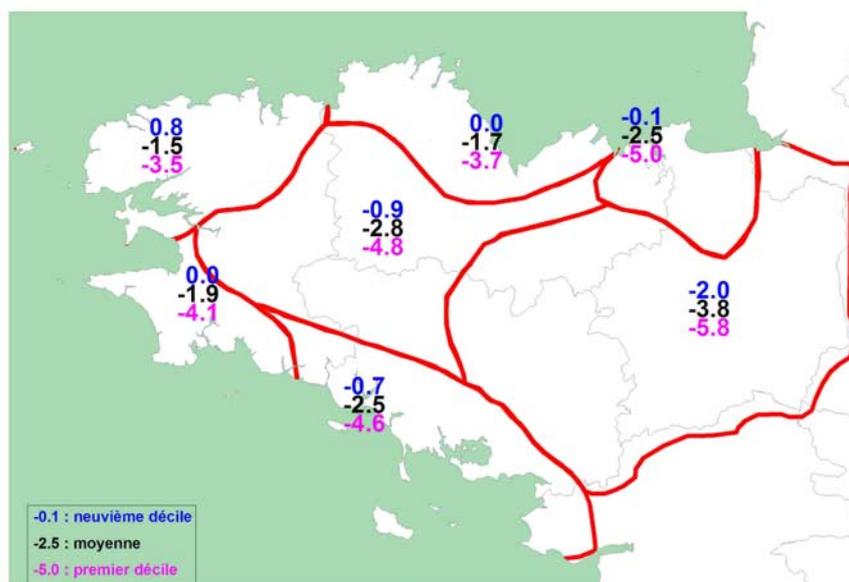
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

	Tmini Rennes	Tmini Brest	Tmini St-Brieuc	Tmini Quimper	Tmini Lorient	Tmini Dinard	Tmini Rostrenen
minimum	-9.4	-7.2	-6.7	-6.2	-6.6	-8.1	-7.6
date du minimum	20090110 matin	20090104 matin	20030109 matin	20050301 matin	20050301 matin	20090104 matin	20030109 matin
Q ₁₀	-5.8	-3.5	-3.7	-4.1	-4.6	-5	-4.8
médiane	-3.7	-1.6	-1.6	-1.7	-2.3	-2.3	-2.8
moyenne	-3.8	-1.5	-1.7	-1.9	-2.5	-2.5	-2.8
Q ₉₀	-2	0.8	0	0	-0.7	-0.1	-0.9
maximum	0.8	3.8	2.2	2.2	1.4	2.7	1.9
date du maximum	20060107 matin	20090111 matin	20071117 matin	20100112 matin	20101215 matin	20091219 matin	20080127 matin

*Tableau 2.6 : statistiques des "températures minimales par créneau" de chaque station
calculées sur l'échantillon de situations de grand froid*

Les Q₁₀, moyennes et Q₉₀ sont pointés sur la carte suivante en superposition des zones d'influence de chaque ville en termes de températures minimales.

Statistiques des "températures minimales par créneau"
par zone d'influence de chaque station en termes de températures minimales
pour les 152 créneaux de grand froid sélectionnés

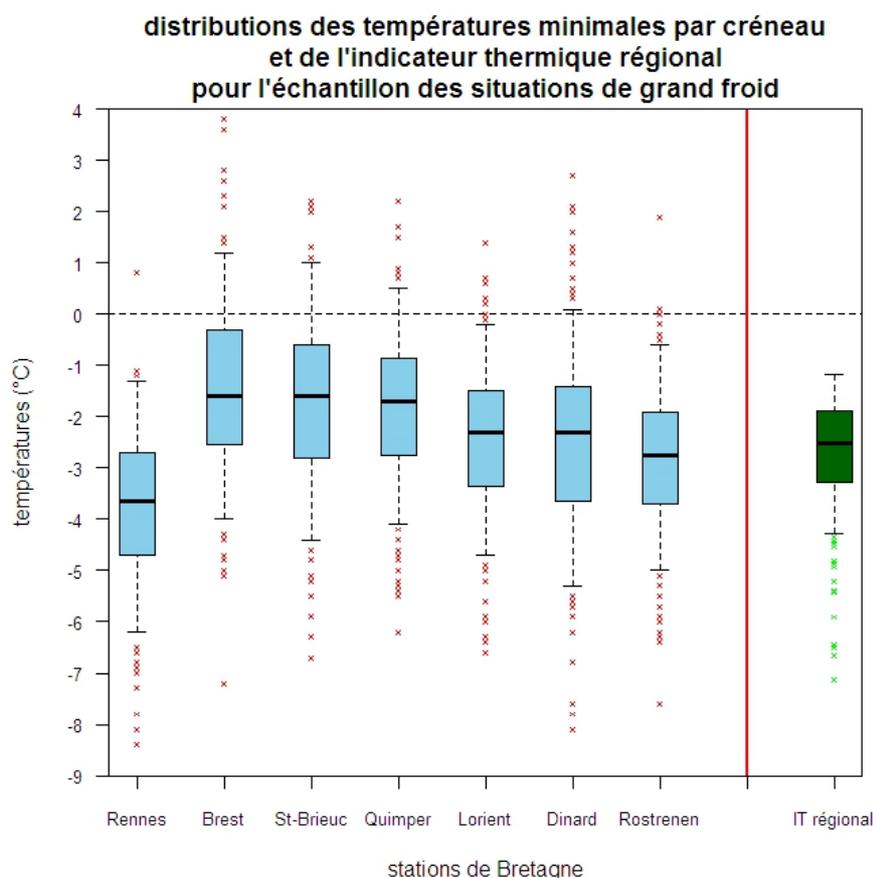


*Carte 2.2 : Q₁₀, moyenne et Q₉₀ de la "température minimale par créneau"
par zone d'influence de chaque ville pour les 152 dates de grand froid*

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Les graphiques de type "boîte à moustaches" (graphe 2.4) permettent de visualiser rapidement l'essentiel de la distribution des "températures minimales par créneau" de chaque station ; placés côte à côte, ils permettent de comparer les stations entre elles. Pour information, la distribution de l'indicateur thermique régional est également représentée à droite du graphique (en vert).

Description d'une boîte à moustaches : la partie inférieure de la boîte (en bleu sur le graphe) correspond au Q_{25} (un quart de l'échantillon est situé en dessous), la partie supérieure au Q_{75} (les trois quarts de l'échantillon sont situés en dessous), le trait à l'intérieur de la boîte correspond à la médiane. La moustache inférieure est tracée au niveau de la valeur de l'échantillon juste en dessous de $Q_{25} - 0,75(Q_{75} - Q_{25})$, la moustache supérieure au niveau de la valeur de l'échantillon juste au-dessus de $Q_{75} + 0,75(Q_{75} - Q_{25})$,

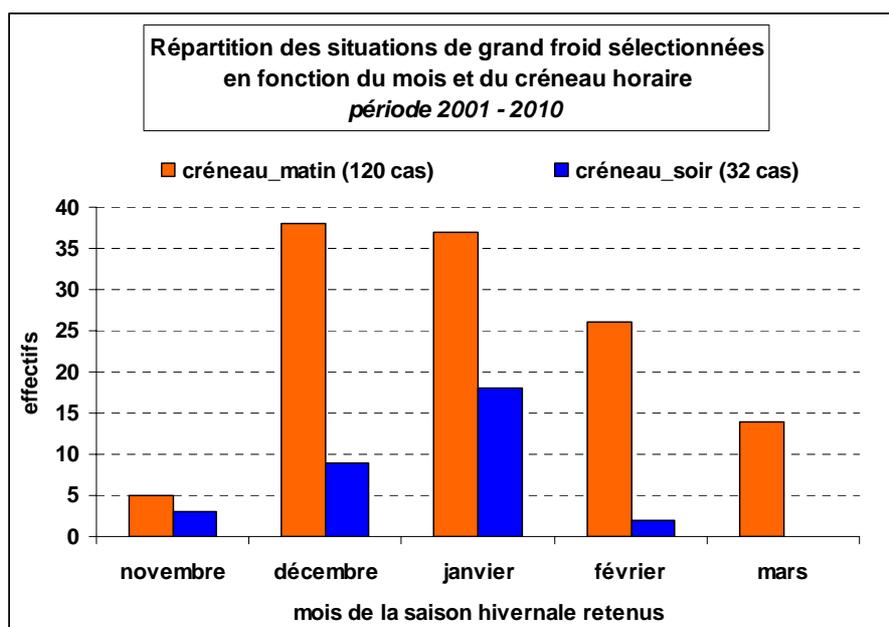


Grappe 2.4 : représentation des distributions de la "température minimale par créneau" de chaque station pour les 152 situations de grand froid sélectionnées

Pour les 152 situations retenues, la station de Rennes est nettement la plus froide et celle de Brest est un peu plus chaude que les autres. L'indicateur thermique régional est une bonne synthèse des 7 villes.

2.3.2. Répartition en fonction des mois

Le graphe 2.5 présente le nombre de créneaux sélectionnés par mois, entre novembre et mars, sur la période 2001-2010. Pour plus de précisions, les créneaux du matin et les créneaux du soir sont distingués.



Graphe 2.5 : répartition des situations de grand froid sélectionnées en fonction du mois (entre novembre et février)

Les créneaux du matin sont nettement plus nombreux que ceux du soir.

Le mois de novembre est le mois le moins concerné ; les créneaux du soir y sont quasiment aussi nombreux que ceux du matin.

Les situations de grand froid se produisent essentiellement de décembre à février et plus particulièrement en janvier.

En décembre et février, les créneaux du soir sont très peu représentés.

Certaines situations de grand froid peuvent encore se produire en début de journée en mars, mais aucune n'a été observée le soir en mars entre 2001 et 2010.

Le tableau suivant indique par hiver la date la plus précoce parmi les grands froids sélectionnés et la date la plus tardive.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

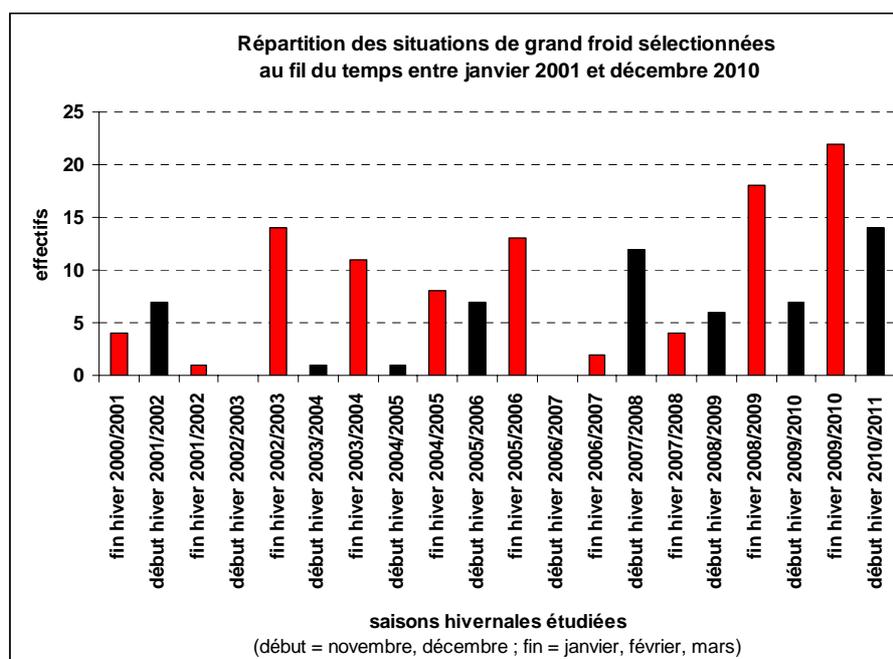
Hiver	Date la plus précoce	Date la plus tardive
fin 2000/2001		05/03/2001
2001/2002	11/12/2001	01/01/2002
2002/2003	05/01/2003	19/02/2003
2003/2004	08/12/2003	11/03/2004
2004/2005	20/12/2004	04/03/2005
2005/2006	21/11/2005	02/03/2006
2006/2007	25/01/2007	26/01/2007
2007/2008	16/11/2007	17/02/2008
2008/2009	08/12/2008	15/02/2009
2009/2010	14/12/2009	08/03/2010
début 2010/2011	28/11/2010	

*Tableau 2.7 : dates de grand froid sélectionnées
la plus précoce et la plus tardive par hiver (entre 2001 et 2010)*

Sur la période entière, la date la plus précoce dans une saison hivernale est le 16 novembre 2007 et la date la plus tardive est le 11 mars 2004.

2.3.3. Evolution au cours des années

La période d'étude débutant un 1^{er} janvier et s'arrêtant un 31 décembre, deux saisons hivernales ne sont pas complètes ; pour cette raison, les saisons hivernales sont scindées en deux parties : "début hiver", de novembre à décembre (en noir), et "fin hiver", de janvier à mars (en rouge).



*Graphe 2.6 : évolution du nombre de situations de grand froid sélectionnées
au fil des hivers entre janvier 2001 et décembre 2010*

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Les situations semblent un peu plus nombreuses ces derniers hivers, mais il est délicat de parler d'une quelconque tendance climatique sur seulement 10 années.

L'hiver complet comprenant le plus de situations de grand froid est l'hiver 2009/2010 et celui comprenant le moins de situations de grand froid est l'hiver 2006/2007 (un seul épisode de deux créneaux consécutifs du 25/01/2007 soir au 26/01/2007 matin).

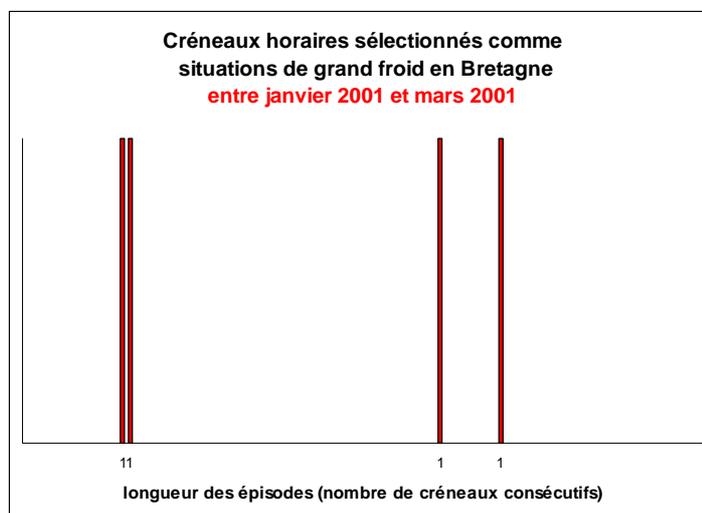
Les hivers 2007/2008 et 2010/2011 ont connu plus de situations de grand froid en début de saison que les autres hivers.

Pour les hivers 2002/2003 et 2006/2007, les situations de grand froid n'ont été observées qu'en fin de saison, entre janvier et mars.

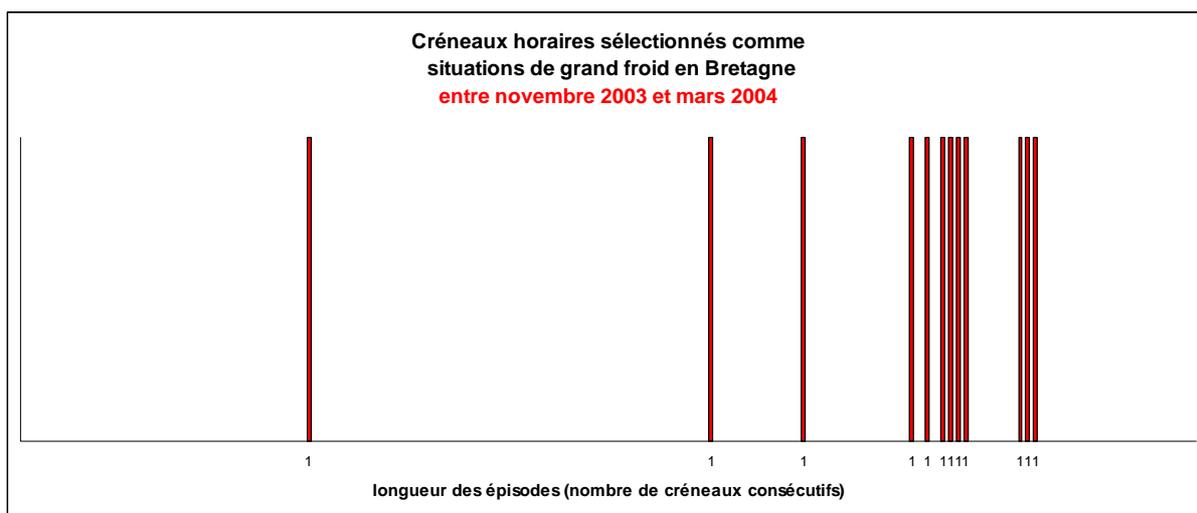
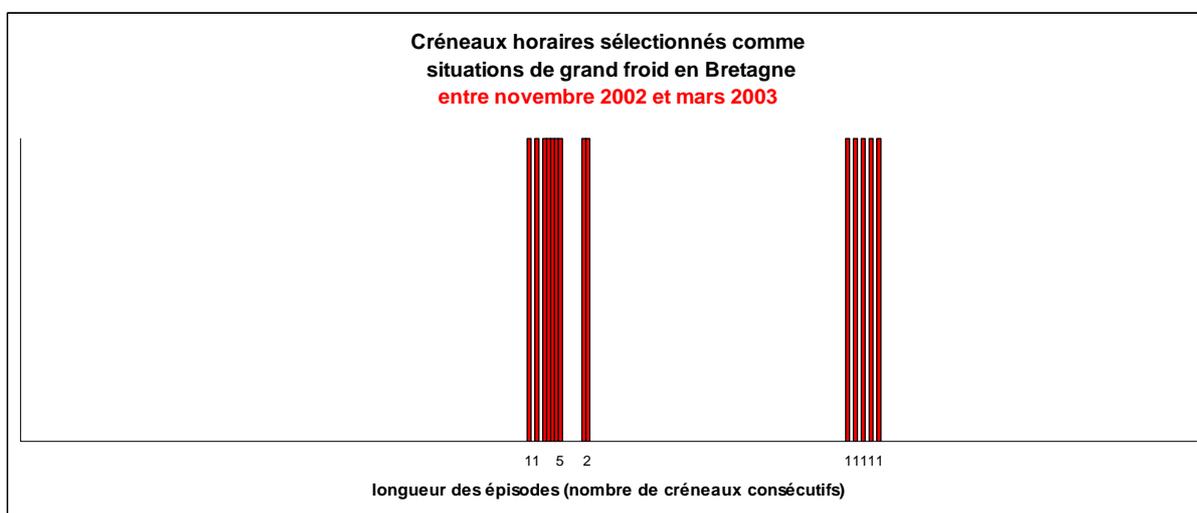
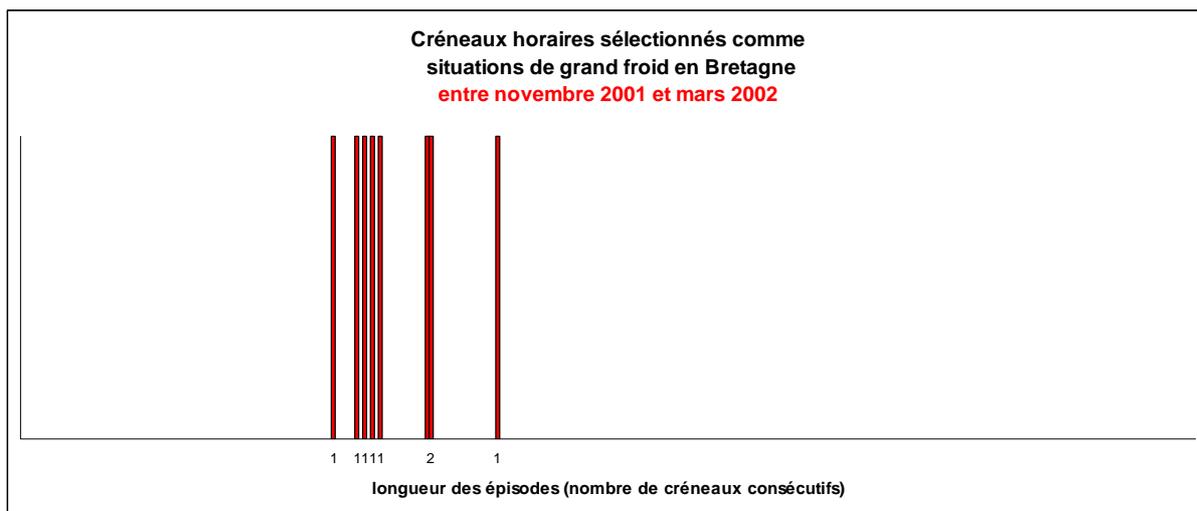
Remarque : il peut être ajouté qu'en 2009, les créneaux du soir ont été quasiment aussi fréquents que les créneaux du matin.

2.3.4. Durée des épisodes

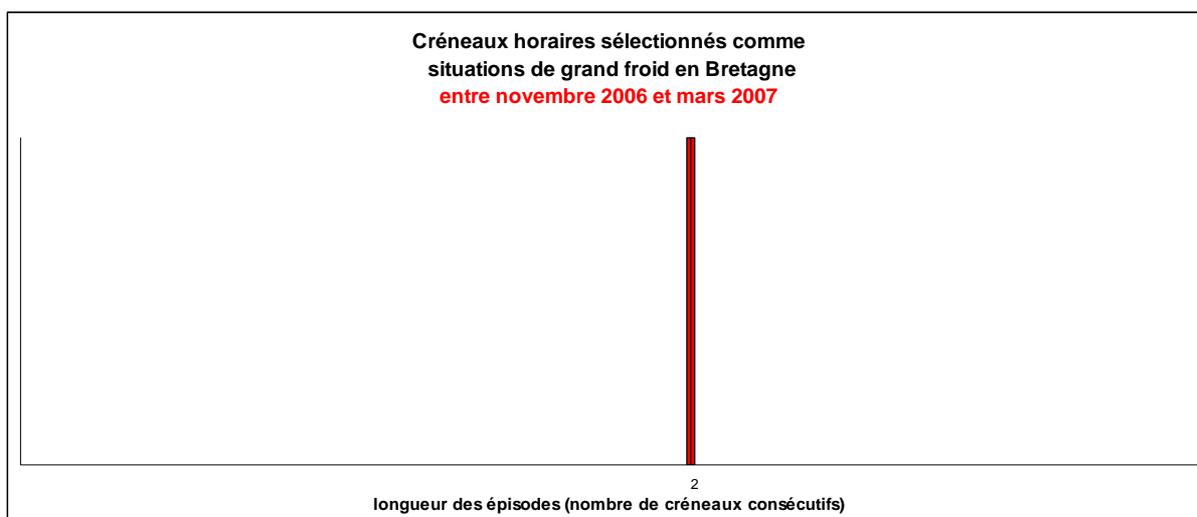
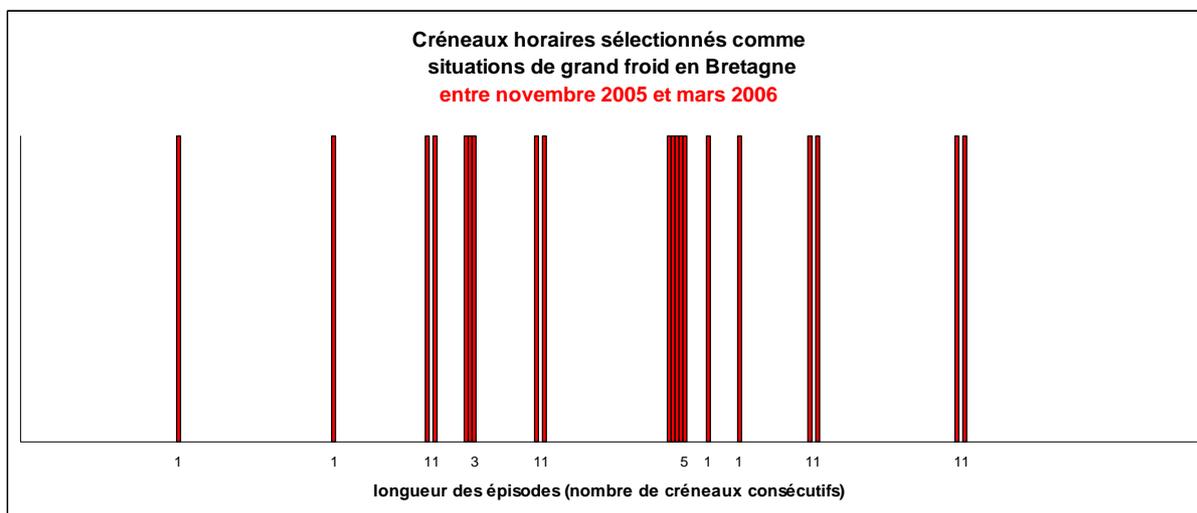
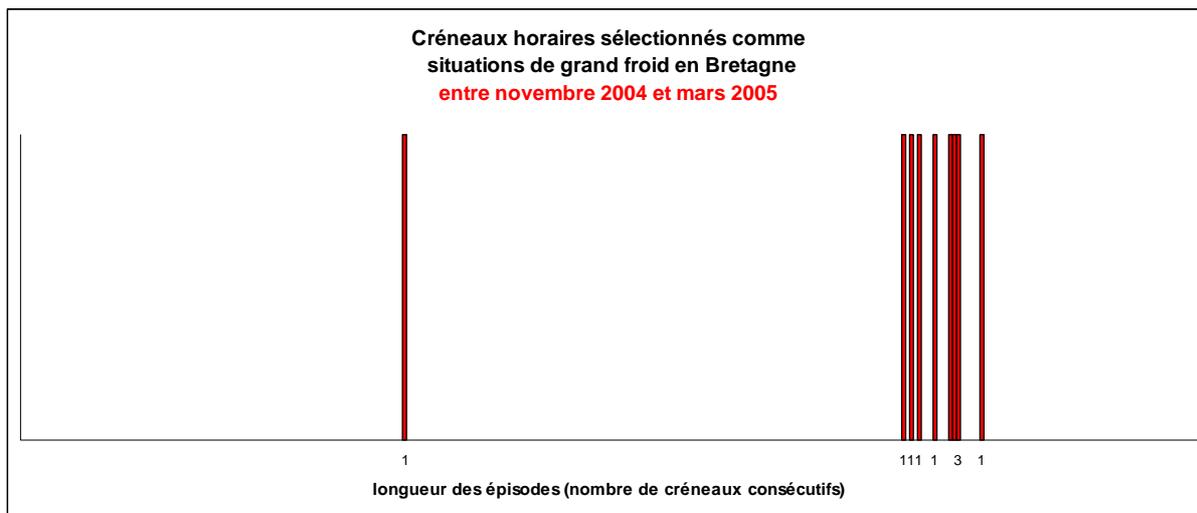
Dans les graphiques suivants (un graphique par saison hivernale), chaque créneau sélectionné est représenté par un bâton rouge. Sous le dernier créneau de chaque épisode est indiqué, en abscisse, le nombre de créneaux consécutifs qui constituent l'épisode.



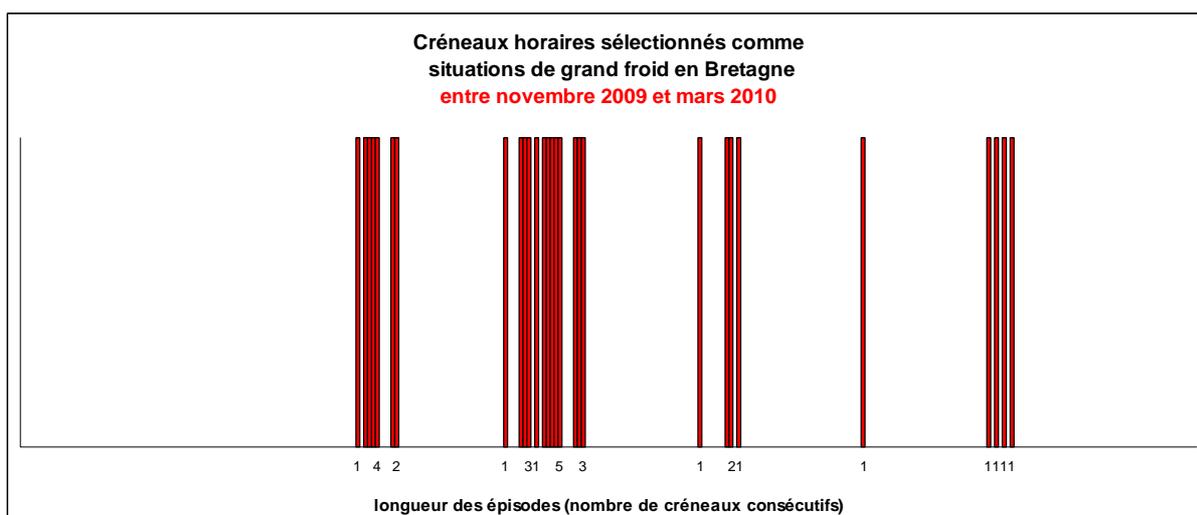
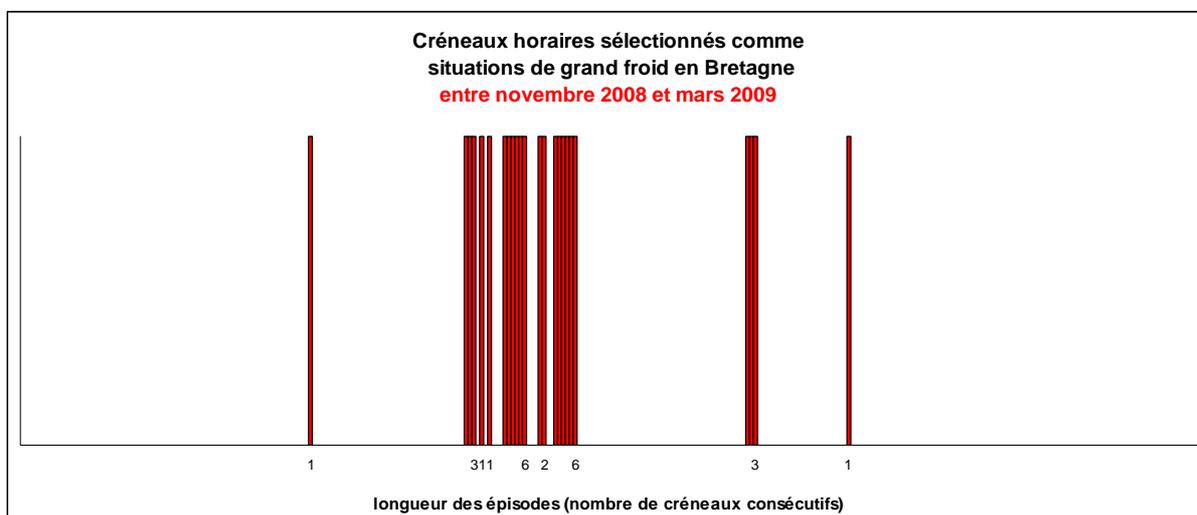
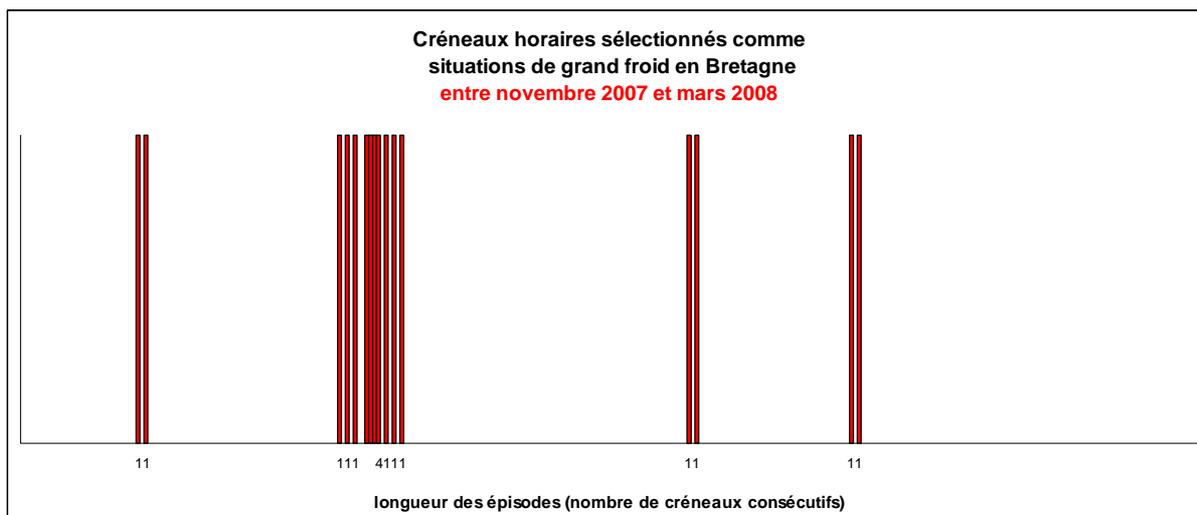
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



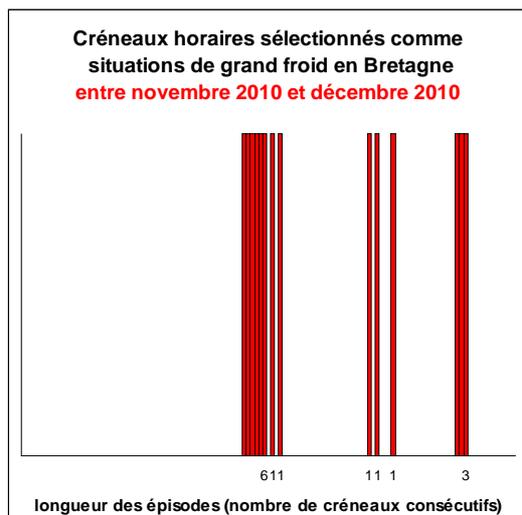
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graphie 2.7 : visualisation chronologique de la longueur des épisodes de grand froid sélectionnés durant les saisons hivernales entre janvier 2001 et décembre 2010

A partir de ces graphiques, il apparaît que les épisodes à un seul créneau sont nettement plus nombreux que les épisodes avec au moins deux créneaux consécutifs (78 pour les premiers et 21 pour les seconds).

Remarque : il peut être précisé que parmi les épisodes à un seul créneau, aucun n'est un créneau du soir ; sur les 21 créneaux avec au moins deux créneaux consécutifs, 14 ont débuté le matin et 7 le soir.

Sur les graphiques, il apparaît également que même s'ils ne sont pas contigus, les épisodes peuvent souvent être très rapprochés et rallonger ainsi la période de grand froid. C'est le cas :

- du 05 janvier 2003 au 12 janvier 2003 : 8 jours au lieu de plusieurs créneaux uniques, un épisode de 5 créneaux consécutifs et un autre de 2 créneaux consécutifs ;
- du 15 février 2003 au 19 février 2003 : 5 jours au lieu de plusieurs créneaux uniques ;
- du 24 février 2004 au 2 mars 2004 : 8 jours au lieu de plusieurs créneaux uniques ;
- du 22 février 2005 au 1^{er} mars 2005 : 8 jours au lieu de plusieurs créneaux uniques et d'un épisode de 3 créneaux consécutifs ;
- du 12 décembre 2007 au 20 décembre 2007 : 9 jours au lieu de plusieurs créneaux uniques et un épisode de 4 créneaux consécutifs ;
- du 28 décembre 2008 au 11 janvier 2009 : 15 jours au lieu de deux créneaux uniques, un épisode de 2 créneaux consécutifs, un autre de 3 créneaux consécutifs et deux autres de 6 créneaux consécutifs ;
- du 14 décembre 2009 au 19 décembre 2009 : 6 jours au lieu de trois épisodes distincts, l'un d'un seul créneau, un autre avec 4 créneaux consécutifs et un troisième avec 2 créneaux consécutifs ;
- du 2 janvier 2010 au 12 janvier 2010 : 11 jours comprenant deux créneaux uniques, deux épisodes avec 3 créneaux consécutifs et un épisode avec 5 créneaux consécutifs ;
- du 28 novembre 2010 au 3 décembre 2010 : 6 jours au lieu d'un épisode avec 6 créneaux consécutifs suivi de deux épisodes à créneau unique.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Remarque : en fait, une étude plus approfondie montre que dans plus de la moitié des cas, deux épisodes distincts se suivent à moins de 3 créneaux d'intervalle.

Le tableau suivant indique comment se répartissent les épisodes de grand froid sélectionnés en fonction du mois (en colonne) et du nombre de créneaux consécutifs constituant l'épisode (en ligne). Parmi la sélection, aucun épisode n'a plus de 6 créneaux **consécutifs**.

	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Total
1 seul créneau	3	25	14	23	13	78
2 créneaux consécutifs		2	4			6
3 créneaux consécutifs		3	2	1	1	7
4 créneaux consécutifs		2				2
5 créneaux consécutifs			3			3
6 créneaux consécutifs		1	2			3

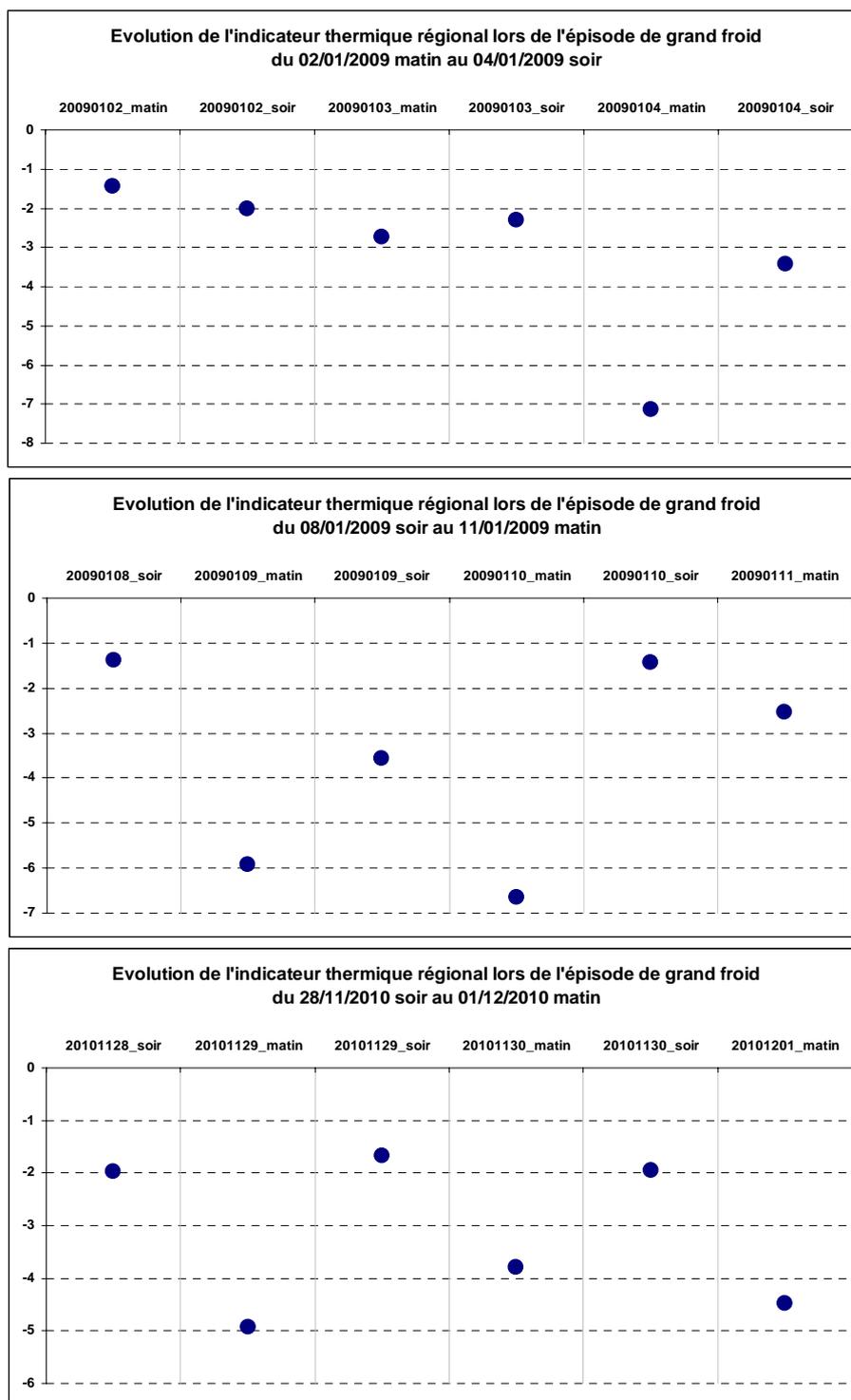
Tableau 2.8 : durée (en nombre de créneaux consécutifs) des épisodes de grand froid par mois

Les épisodes à créneaux consécutifs les plus longs se produisent plutôt entre la fin novembre et janvier (ce qui n'interdit pas, comme vu précédemment, de connaître en février et début mars des périodes froides beaucoup plus longues, réunions d'épisodes courts très rapprochés).

Au plus 6 créneaux consécutifs ont été observés ces dernières années, par trois fois : au début de l'année 2009, du 2 janvier 2009 matin au 4 janvier 2009 soir, cet épisode a été immédiatement suivi d'un nouvel épisode, du 8 janvier 2009 soir au 11 janvier 2009 matin, et en fin d'année 2010, du 28 novembre soir au 1^{er} décembre matin.

Le graphique suivant présente l'évolution de l'indicateur thermique régional pour ces trois épisodes.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graphe 2.8 : évolution de l'indicateur thermique régional lors des trois épisodes de six créneaux consécutifs (les plus longs observés entre 2001 et 2010)

2.4. Conclusion sur l'échantillonnage de situations de grand froid

152 situations ont été sélectionnées, entre 2001 et 2010 et entre novembre et mars, pour étudier par la suite le potentiel éolien disponible lors des périodes de grand froid observées au moment des deux pics de consommation électrique assez courts de la journée, le matin entre 6 et 9 UTC et le soir entre 18 et 21 UTC.

La sélection a été réalisée à partir des températures minimales observées, au moment des deux créneaux horaires ciblés, sur les stations de sept villes bretonnes : Brest, Quimper, St-Brieuc, Rostrenen, Lorient, Rennes et Dinard, et du pourcentage de la population bretonne potentiellement impactée par chaque température.

Pour toutes les situations, il existe au moins l'une des 7 températures inférieure ou égale à -2 °C.

Dans la grande majorité des cas, les 7 températures sont généralement toutes négatives et ce sont l'Est et/ou le Sud-Est de la région qui présentent les températures les plus froides. Les quelques exceptions pourront être intéressantes à étudier par la suite. C'est le cas :

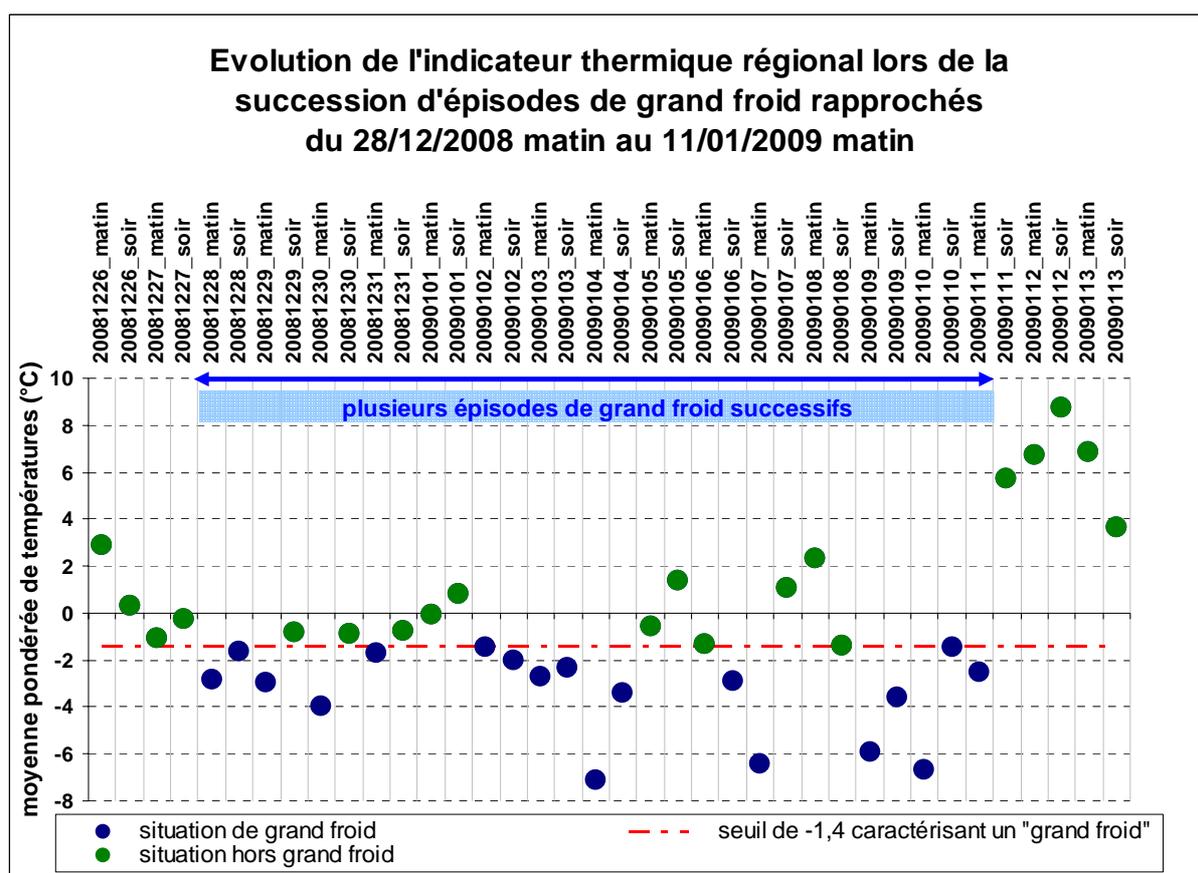
- 20090110_soir (3 températures sur 7 positives)
- 20091215_soir (températures négatives seulement sur l'Est)
- 20081208_matin (plus froid sur le Finistère)
- 20071216_matin, 20090202_soir, 20100307_matin (Nord-Ouest le plus froid)
- 20081208_matin (côtes de la Manche les plus froides)
- 20060107_matin (côtes atlantiques les plus froides)

Les situations du matin sont beaucoup plus nombreuses que celles du soir et se produisent surtout entre décembre et février.

Entre 2001 et 2010, les épisodes à un seul créneau horaire sont très fréquents ; il n'est d'ailleurs observé aucun épisode qui dépasse plus de 7 créneaux horaires consécutifs. Les trois épisodes les plus longs présentent 6 créneaux consécutifs, ils se sont déroulés du 2 janvier 2009 matin au 4 janvier 2009 soir, du 8 janvier 2009 soir au 11 janvier 2009 matin, et du 28 novembre 2010 soir au 1^{er} décembre 2010 matin.

En revanche, les épisodes sans être contigus sont généralement très proches ; il est ainsi possible de trouver plusieurs périodes de froid dépassant la semaine avec quelques courtes interruptions à l'intérieur. La période de ce type la plus longue de l'échantillon débute le 28/12/2008 matin pour ce terminer le 11/01/2009 matin. L'évolution de l'indicateur thermique régional durant cette période est reproduite sur le graphique 2.9.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique
en périodes de grand froid



Graphe 2.9 : évolution de l'indicateur thermique régional lors de la période de froid la plus longue survenue entre 2001 et 2010

Partie 3. Potentiel éolien par grand froid

3.1. Contexte

Les parties précédentes de cette étude ont permis de sélectionner un échantillon représentatif des grands froids sur la période 2001/2010. En suivant la méthodologie détaillée dans cette troisième partie, nous effectuerons une estimation globale de la production électrique éolienne bretonne par grand froid selon diverses hypothèses. Ce travail s'est effectué en collaboration avec le Conseil Régional de Bretagne. Il a nécessité certains choix qui sont détaillés dans ce rapport et qui ont été validés par les deux partenaires au cours des étapes préliminaires à cette étude.

Notre ambition n'est pas de vouloir reconstituer précisément l'apport de chaque parc éolien breton. Ce travail nécessiterait de prendre en compte les spécificités de chaque machine et les effets locaux des vents autour de chaque parc. Il s'agit plutôt ici de raisonner de manière globale en utilisant des machines virtuelles, mais au comportement réaliste, implantées dans des regroupements de zones.

L'objectif de cette troisième partie est de réaliser une estimation du potentiel éolien breton en période de grand froid. Pour cela on s'appuie sur une méthode de reconstitution du vent homogène à une hauteur proche de celle du moyeu des machines. Ces données (nommées Aladin) serviront de données d'entrée pour le calcul de production électrique éolienne théorique à l'aide d'une courbe de puissance standard.

Pour cibler au mieux la problématique de grand froid, on utilisera en données d'entrée les dates et créneaux horaires définis dans la deuxième partie de l'étude.

La production électrique théorique est volontairement estimée globalement en ordre de grandeur. Elle peut être considérée comme un apport minimal théorique en période de grand froid.

3.2. Méthode d'estimation du potentiel éolien

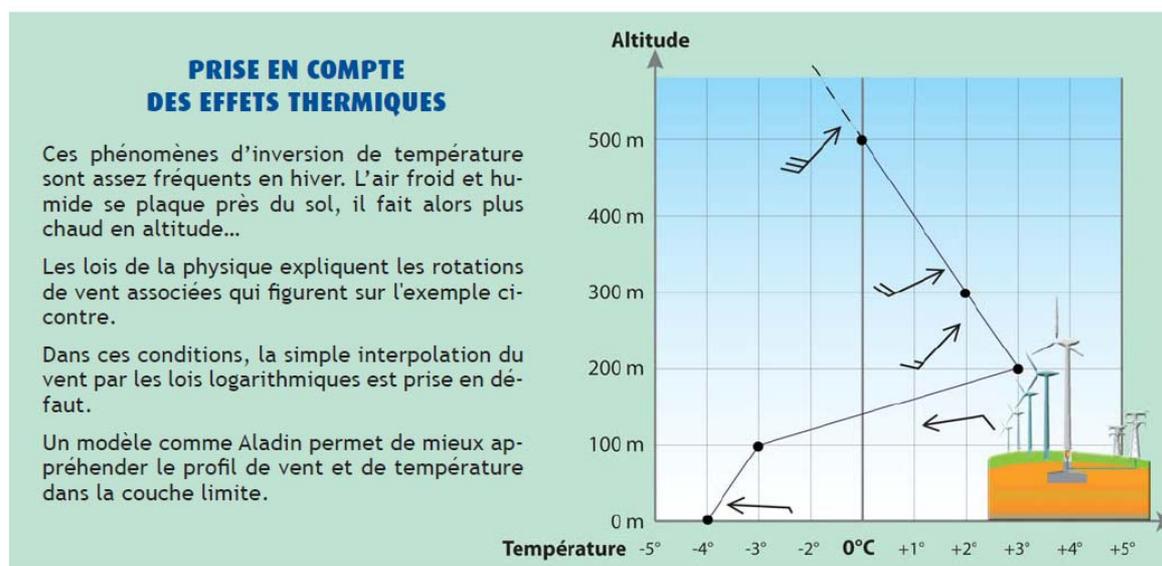
3.2.1. Estimation du vent : le modèle Aladin

Les modèles météorologiques permettent de faire des simulations de l'atmosphère en trois dimensions avec une résolution de plus en plus fine. Ces systèmes sont élaborés à partir des équations de base de la thermodynamique adaptées à l'atmosphère. Avant de faire des prévisions, il est nécessaire de reconstituer l'état des différents paramètres (pression, température, humidité, vent...) et ce, à différentes altitudes. Ces modèles de prévisions sont utilisés chaque jour par les prévisionnistes et confrontés entre eux.

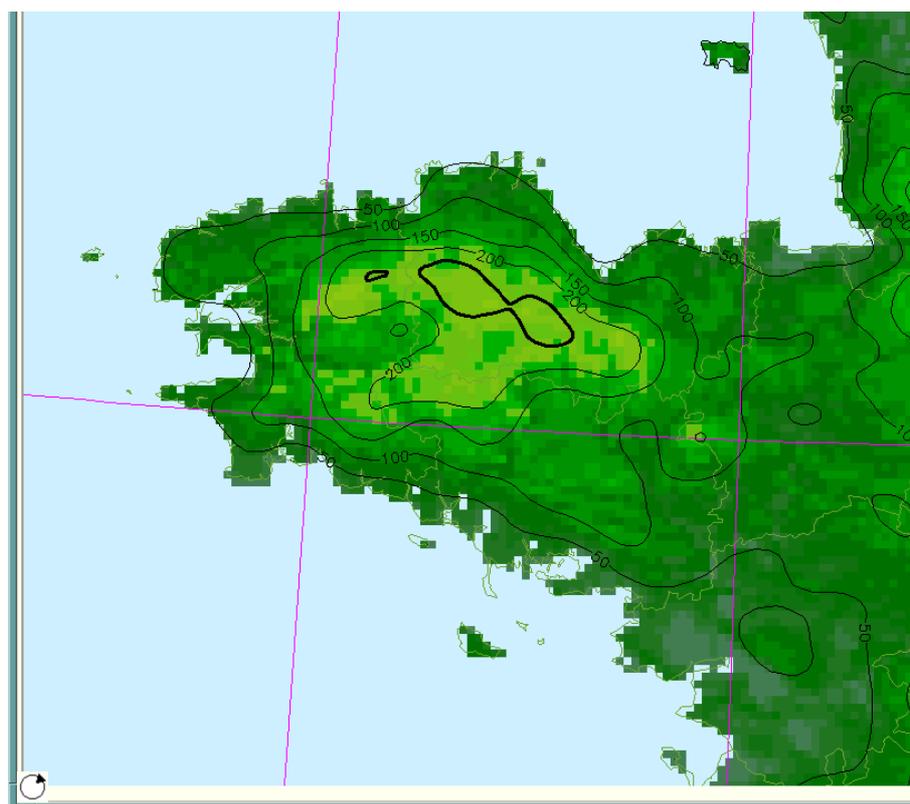
Les données initiales du modèle (à l'instant $t = 0$) sont issues des simulations précédentes et corrigées au besoin par l'ensemble des observations disponibles (mesures des stations au sol, des ballons sonde, données satellitaires...). Elles sont analysées sur une grille de résolutions horizontale et verticale cohérentes avec la physique du modèle. Ces reconstitutions sont donc bien plus sophistiquées que des modèles de simple interpolation mathématique. Elles sont capables de gérer des rotations de vent consécutives au passage de fronts ou des effets de cisaillement de vent lors d'inversion thermique par exemple.

Avec son modèle Aladin, à résolution horizontale de 10 km environ, Météo France dispose d'un archivage homogène d'une dizaine d'années et donc d'une climatologie des paramètres météorologiques analysés en 3 dimensions, et par pas de temps de 3 heures, sur un domaine couvrant l'Europe de l'Ouest. Une telle résolution permet de prendre en compte des phénomènes de petite échelle tels que les brises thermiques, les accélérations du vent au niveau de l'interface terre/mer, les inversions de température, etc. Ces phénomènes sont très bien restitués par le modèle Aladin en dehors des zones de reliefs (sur lesquels des modèles plus fins mais beaucoup plus gourmands en temps de calcul sont alors préférables).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



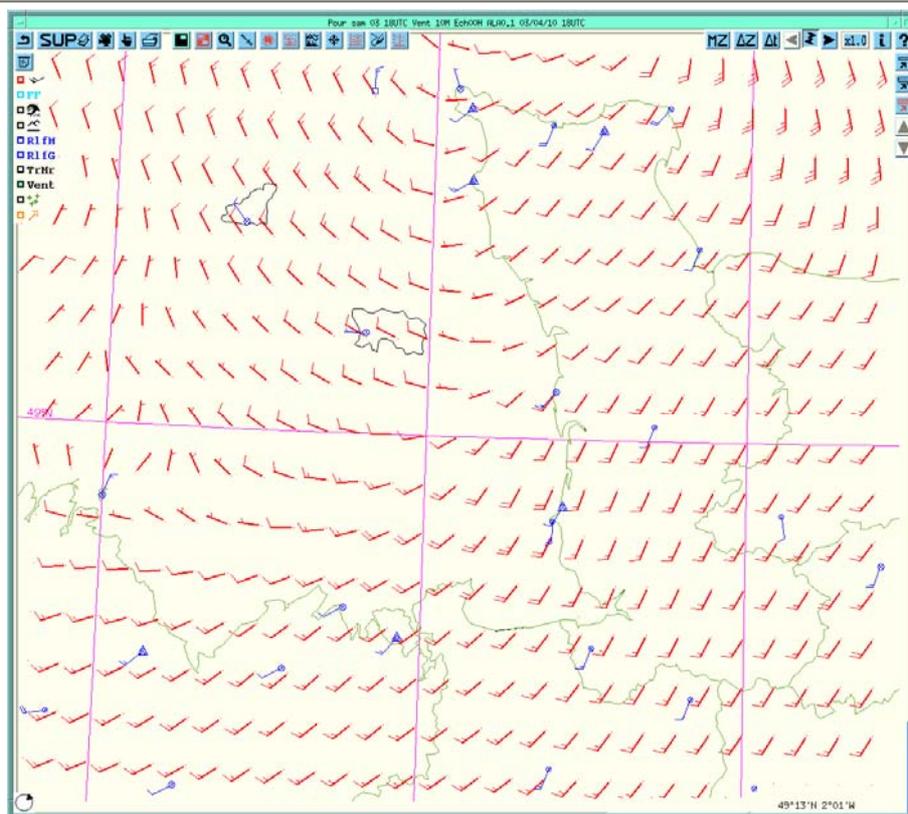
Graph 3.1 : prise en compte des effets thermiques de basses couches dans un modèle météorologique



Carte 3.1 : relief Aladin (isolignes noires) et relief réel (pixels de tons verts)

Avec une telle résolution horizontale, il est donc possible de prendre en compte les phénomènes météorologiques les plus influents sur le vent dans nos régions ainsi qu'un relief réaliste, mais forcément imparfait. La reconstitution du vent par le modèle Aladin est donc bien adaptée à la problématique d'estimation globale du potentiel éolien en Bretagne, que ce soit sur un jour donné ou sur une plus longue période.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Carte 3.2 : exemple d'analyse Aladin du vent à 10m (en rouge) le 3 mars 2010 vers 18 h (les vents mesurés sont en bleu).

Les observations disponibles en bleu, pour cet exemple, témoignent de la finesse de l'analyse qui prend en compte la rotation de vent. On notera cependant une sous-estimation de la force du vent du côté de l'île de Bréhat sur ce cas particulier.

Pour cette situation avec rotation de vent très nette, le modèle permet une très bonne analyse du vent en mer qu'il serait impossible d'obtenir à partir d'interpolations des observations compte tenu des rotations et accélérations du vent au passage d'une dépression.

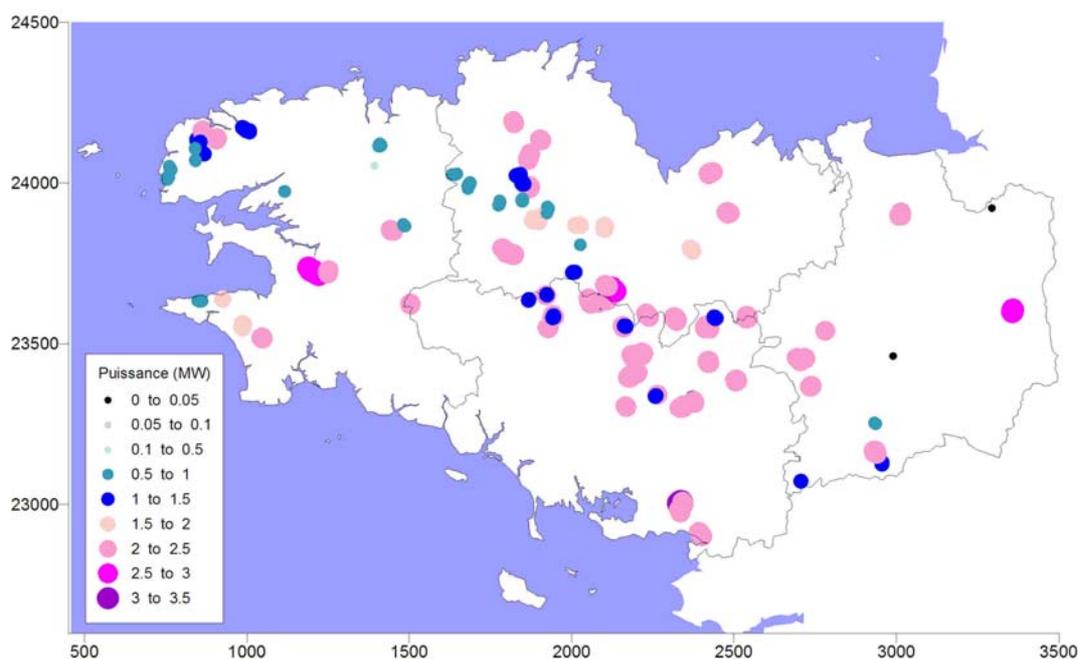
En compilant ce type de données sur plusieurs années, on dispose donc d'une série de données de vent (direction, force) de 10 années complètes (période 2001/2010) reconstituées toutes les 3 heures, sur une grille de résolution horizontale 10 km. Les hauteurs du modèle disponibles dans les basses couches de l'atmosphère sont à 10, 20, 50, 80, 100 et 120 mètres au-dessus du sol. Elles sont bien adaptées à l'étude du potentiel éolien.

Le modèle Aladin dispose d'une reconstitution de l'ensemble des paramètres météorologiques (température, humidité, pression). Ceux-ci ont une influence sur le fonctionnement des éoliennes et auraient pu être pris en compte. Compte tenu de la globalité de notre estimation de production électrique, cette option n'a pas été retenue ici mais pourrait l'être dans des travaux ultérieurs.

3.2.2. Courbe de puissance des machines

Le parc éolien breton actuel est constitué d'une multitude de machines à puissance nominale variant de quelques dizaines de kilowatts à 2 500 kW. On ne comptabilise ici que les machines soumises à permis de construire. Il est vite apparu illusoire de vouloir prendre en compte toutes ces machines pour lesquelles il est impossible de récupérer l'ensemble des courbes de puissance et les modes de fonctionnement.

Eoliennes construites en BRETAGNE début 2011



Carte 3.3 : implantation des éoliennes en Bretagne début 2011 en fonction de leur puissance
(source Conseil Régional)

Notre choix s'est donc porté sur la recherche de courbes de puissance des machines récentes les plus puissantes (2 à 2.5 MW) et les plus fréquemment installées en Bretagne. Les données fournies par le Conseil Régional ne contenaient pas d'informations sur le type des machines installées. Le site « www.suivi-eolien.com » géré par l'Ademe nous a permis de lister les caractéristiques des principales machines implantées en Bretagne :

- 35 % des parcs bretons sont constitués de machines Enercon (souvent E82 de 2 MW) ;
- 18 % des parcs sont constitués de machines Vestas (souvent V90 de 2 MW) ;
- 30 % des parcs sont constitués de machines Gamessa, Nordex ou Neg Micon pour à peu près la même répartition (soit 10 % environ du total pour chaque fabricant) ;
- le reste (17 %) est constitué de machines de divers fabricants.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Une recherche sur internet a permis de récupérer quelques courbes de puissance des machines les plus fréquentes (Enercon E82 et Vestas V90). Les tableaux de puissance en fonction de la vitesse du vent sont présentés ci-après.

Eolienne Enercon 2 MW

Vitesse du vent en m/s	Puissance en kW	Pourcentage de la puissance maximale
1	0	0 %
2	0	0 %
3	25	1.3 %
4	82	4.1 %
5	174	8.7 %
6	321	16.1 %
7	532	26.6 %
8	815	40.8 %
9	1 180	59.0 %
10	1 612	80.6 %
11	1 890	94.5 %
12	2 000	100.0 %
13	2 050	102.5 %
14	2 050	102.5 %
15	2 050	102.5 %

Tableau 3.1 : tableau de puissance d'une éolienne Enercon E82 (source fabricant)

Eolienne Vestas V90 2 MW

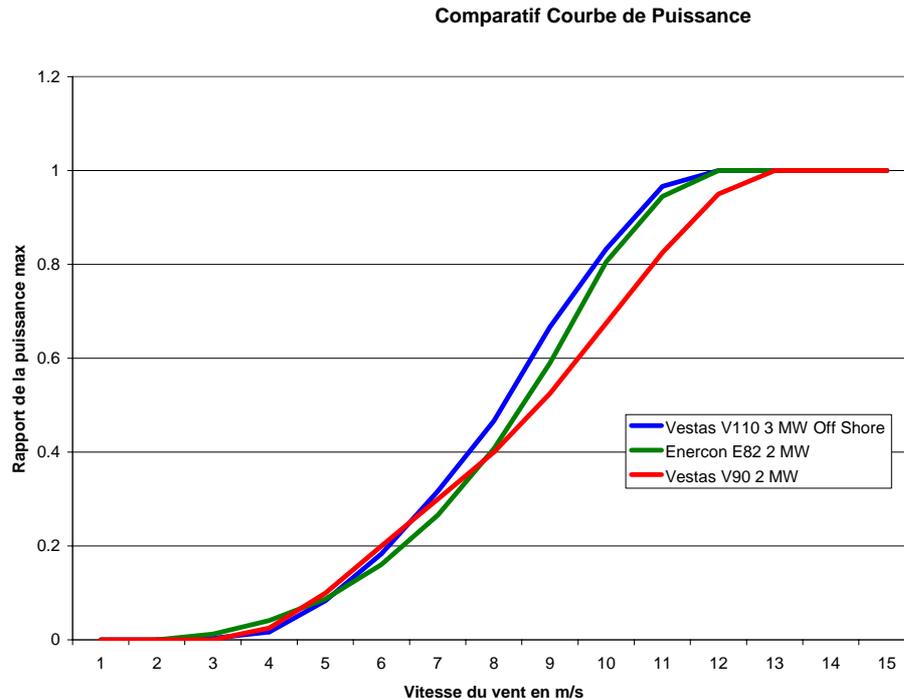
Vitesse du vent en m/s	Puissance en kW	Pourcentage de la puissance maximale
1	0	0 %
2	0	0 %
3	0	0 %
4	50	2.5 %
5	200	10 %
6	400	20 %
7	600	30 %
8	800	40 %
9	1 050	52.5 %
10	1 350	67.5 %
11	1 650	82.5 %
12	1 900	95 %
13	2 000	100 %
14	2 000	100 %
15	2 000	100.1 %

Tableau 3.2 : tableau de puissance d'une éolienne Vestas V90 de 2 MW (source fabricant)

On constate que les courbes de puissance de ces deux machines fournies par les fabricants sont assez semblables. Elles dépassent 50 % de leur puissance maximale entre 8 et 9 m/s puis atteignent toutes les deux leur puissance maximale pour des vents de 12 à 13 m/s.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

D'autres machines peuvent avoir des courbes de puissance assez différentes surtout si elles sont optimisées pour des classes de vent assez fort. C'est notamment le cas des machines Nordex type E80. Cependant, des machines de plus faible puissance (par exemple de type Vergnet de 10 kW) ont des courbes qui se rapprochent de celles présentées ici. Pour la suite, on pourra donc considérer que la courbe de puissance type Enercon E82 peut s'appliquer à la plupart des machines installées en Bretagne, quelle que soit leur puissance, si l'on raisonne en ordre de grandeur et en pourcentage de la puissance maximale disponible.



Graphie 3.2 : comparaison de courbes de puissance de 3 éoliennes de 2 à 3 MW
(en pourcentage de la puissance maximale)

3.3. Eléments de validation

Météo-France ne dispose pas de mesures de vent à des altitudes supérieures à 10 mètres en Bretagne. Il ne nous est donc pas possible de valider directement la reconstitution du vent Aladin à la hauteur des moyeux des éoliennes. Ces vents sont mesurés sur la plupart des parcs existants mais ils seraient très difficiles à exploiter (les anémomètres sont souvent situés sur la machine même, en aval des pales : la mesure de vent est donc très perturbée par celles-ci).

Cette étape de validation a été donc élargie à un calcul direct d'énergie électrique théorique, suivi d'une comparaison avec des données fournies par les exploitants sur deux parcs bretons existants.

3.3.1. Méthode de calcul et choix du niveau de référence

A partir des vents tri-horaires reconstitués par le modèle Aladin et de la courbe de puissance d'une éolienne, on peut reconstituer une production électrique théorique.

Il faut pour cela choisir un niveau de référence pour le vent. Grâce aux données de production électrique réelle, fournies par Patrick Saultier, gérant du Parc de Plélan (35), nous avons pu procéder à un premier choix du niveau à 50 mètres pour les parcs terrestres (alors que la plupart des machines de 2 MW ont un moyeu situé vers 80 mètres). Ce choix était dicté par une tendance, assez connue du modèle Aladin, à surestimer légèrement les vents sur terre. Il est confirmé par les comparatifs figurant dans le tableau ci-dessous. Pour le constituer, nous avons calculé la production théorique moyenne sur 10 ans sur le parc de Plélan constitué de 6 machines Enercom E82 de 2 MW.

Vent Aladin 50 m	Vent Aladin 80 m	Vent Aladin 100 m
25 200 MW/h	32 400 MW/h	36 000 MW/h

La production d'une année moyenne a été estimée par le gestionnaire, au moyen d'études préalables prenant en compte les caractéristiques locales, sur ce parc de Plélan, à environ 27 000 MW/h par an. Ce chiffre est confirmé par les deux années de production récentes. Il s'avère qu'en utilisant le vent Aladin à 50 mètres, on obtiendrait une production électrique réaliste, légèrement sous-estimée par rapport à la réalité.

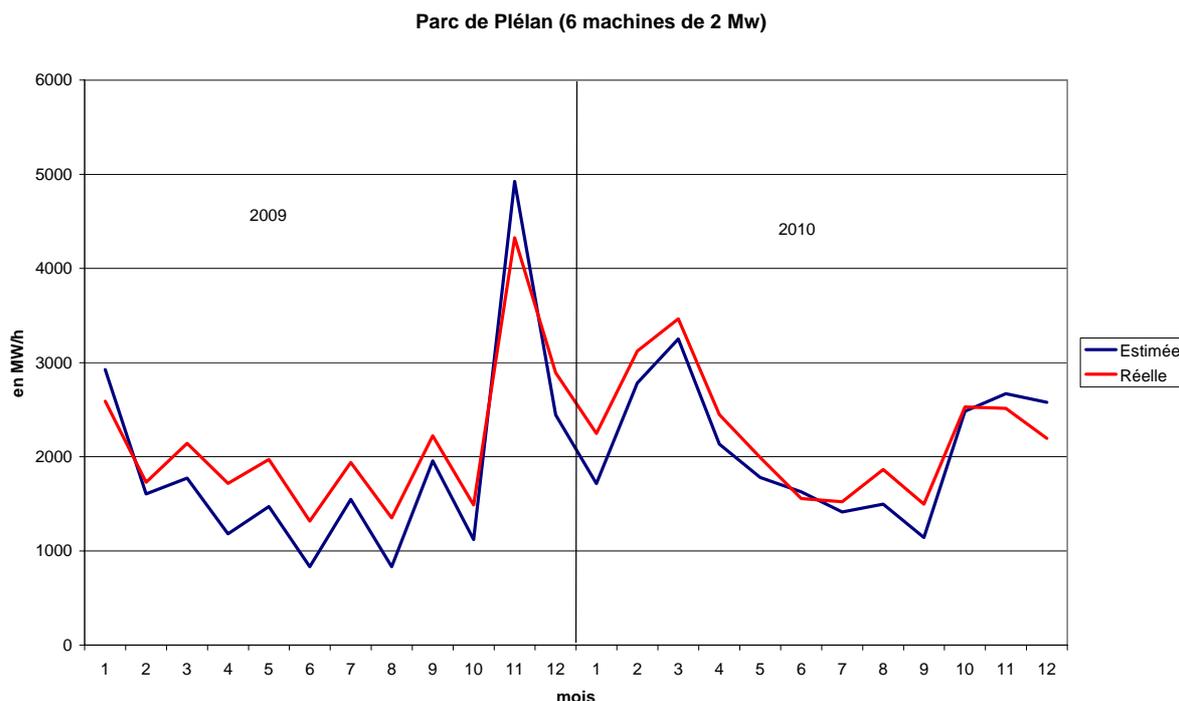
En mer, pour les parcs « off shore », notre choix se portera sur les vents à 100 mètres (hauteur des moyeux envisagés). Il est confirmé par des données de validation explicitées au paragraphe 3.3.3 ci-après.

3.3.2. Validation mensuelle de la méthode sur le parc de Plélan (35)

Grâce aux données de production électrique mensuelle fournies pour le parc de Plélan pour les années 2009 et 2010, nous pouvons valider la méthode de reconstitution du potentiel de production en utilisant les vents Aladin à 50 mètres et la courbe de puissance théorique de l'éolienne Enercom E82. Pour cela, nous avons admis l'hypothèse de vents constants sur le pas de temps de 3 heures disponible.

Les courbes ci-après montrent une très bonne concordance entre la production réelle (en rouge) fournie par le gestionnaire du parc de Plélan, et celle estimée par notre méthode (en bleu). La corrélation est très bonne puisque l'on arrive à bien simuler les variations d'un mois sur l'autre. On note une fréquente, mais faible (10 % environ), sous-estimation de la production électrique, sauf pour le mois très venté de novembre 2009 où notre méthode surestime la production réelle.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Graphie 3.3 : comparaison entre la production effective du parc éolien de Plélan (35) en rouge et celle estimée par notre méthode en bleu sur les années 2009 et 2010.

Pour cette phase de validation sur ce parc, les périodes de non-disponibilité des machines (cause panne ou maintenance) n'ont pas été prises en compte. Leur impact peut être considéré comme négligeable, à l'échelle régionale, compte tenu du caractère global de notre estimation du potentiel éolien.

3.3.3. Autres données de validation

Pour valider complètement notre méthode, il est nécessaire de travailler sur d'autres points que le seul parc de Plélan (qui a évidemment ses spécificités). Monsieur Jacques Treillu, gérant du parc de Cast (29), nous a fourni des données mensuelles de production identiques à celles de Plélan pour la période d'avril 2009 à décembre 2010. Pour des raisons de confidentialité, nous n'avons pas l'autorisation de les rediffuser dans ce document (sous forme d'un graphique identique à celui de Plélan).

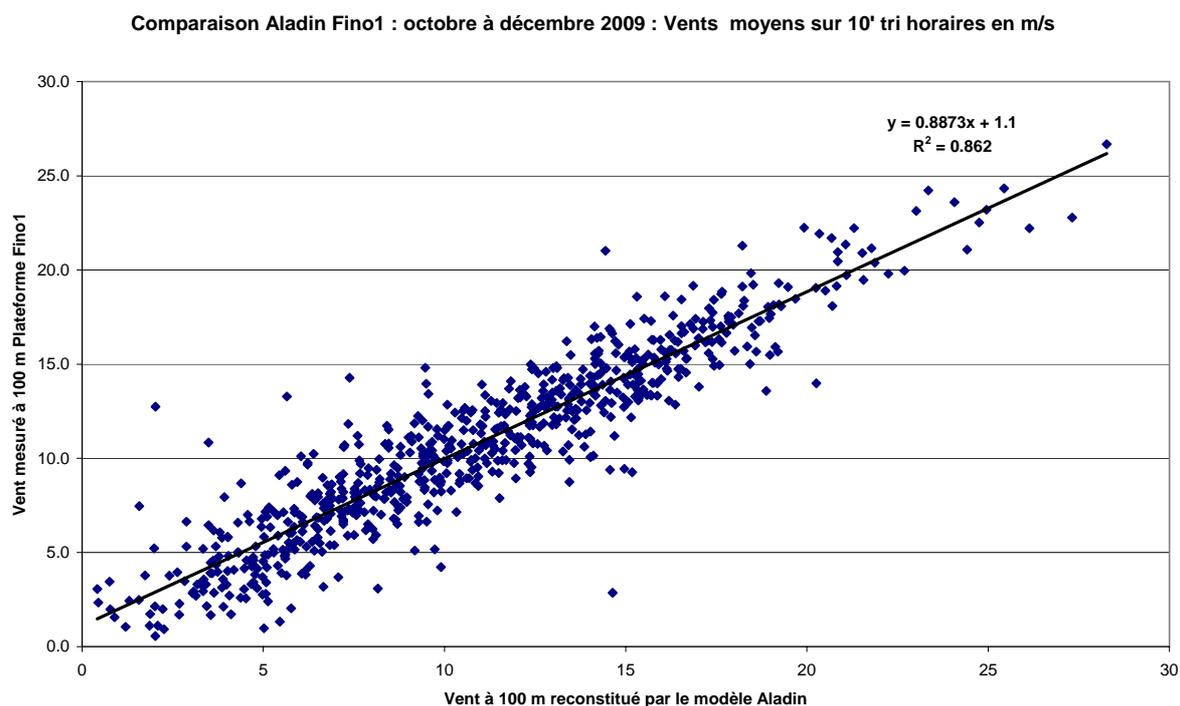
Les éoliennes de Cast sont 4 machines type Nordex E80 d'une puissance de 2.5 MW. En utilisant la même méthode et la courbe de puissance fabricant de ces machines, on obtient des résultats cohérents avec ceux de Plélan. La restitution de la variabilité de la production électrique selon les mois, par exemple, est aussi bonne. Cependant, la sous-estimation de la production de Cast varie de 10 à 30 % selon les mois. Notre méthode de reconstitution est donc un peu moins performante que sur Plélan, probablement :

- à cause de conditions locales spécifiques (ces éoliennes sont implantées sur un relief à 10 km environ du bord de mer) ;
- en raison d'une optimisation particulière de la courbe de puissance des machines Nordex E80 (optimisation pour des classes de vent assez fort).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Pour valider le choix des données Aladin à 100 mètres en mer, nous avons utilisé des données de vent mesurées sur un mât allemand, le mât « Fino », installé depuis plusieurs années en mer du Nord à 20 km au large de la frontière entre l'Allemagne et les Pays-Bas. Il n'existe pas de mesures identiques exploitables dans cette étude en France.

On trouvera ci-après une comparaison du vent à 100 mètres réalisée entre les données Aladin et les mesures effectuées par l'état allemand sur le mât « Fino ». Sur les 3 mois comparés (d'octobre à décembre 2009), on constate une très bonne corrélation entre la mesure et l'estimation Aladin.



Graph 3.4 : comparaison entre le vent mesuré à 100 mètres sur le mât allemand « Fino » et l'estimation du modèle Aladin

Cette très bonne corrélation entre mesures (mât « Fino ») et données reconstituées par Aladin en mer à 100 mètres confirme le choix de la hauteur Aladin pour les fermes éoliennes « off shore ». La corrélation en mer à 100 mètres de hauteur (sans biais significatif) est logiquement supérieure à celle qu'on pourrait obtenir pour les éoliennes terrestres (choix du modèle à 50 mètres). En l'absence d'effet local et avec une faible rugosité (sur mer), le modèle Aladin reconstitue encore mieux le vent.

Le profil de côte et le climat dans l'Ouest de la France sont très proches de celui de la mer du Nord. Ces résultats sont donc très probablement exportables au large des côtes bretonnes. Ce ne serait pas forcément le cas dans des zones au relief plus tourmenté (par exemple au large de la Côte d'Azur).

Quelques éléments fournis par la société « Nass & Wind Offshore » de Lorient confirment cette très bonne capacité du modèle Aladin à reconstituer le vent en mer à 100 mètres de hauteur y compris en Bretagne (notons toutefois que dans le cadre des demandes de financement de projets éoliens « off shore », des mesures de vent sont indispensables afin de réduire les incertitudes de façon acceptable). Cette société effectue des mesures de vent par Lidar dans les basses couches de l'atmosphère sur deux sites situés à proximité des futurs parcs éoliens « off shore ». Le lidar est un appareil utilisant l'analyse de la perturbation du signal optique par le vent. Il permet des mesures très précises du vent dans les premières centaines de mètres de hauteur.

La société « Nass & Wind Offshore » a effectué des comparaisons entre les données Aladin et ses mesures par Lidar pour deux sites : sur le phare du Grand Léjon en baie de St-Brieuc et sur un îlot proche de Noirmoutier. Même si la réduction des incertitudes passe obligatoirement par des mesures sur site, à l'échelle de la semaine, les corrélations entre les deux sources de données sont jugées bonnes avec des valeurs de l'ordre de 0.9. Là aussi, pour des raisons de confidentialité, il n'est pas possible de fournir des données plus précises dans ce rapport.

3.4. Estimation du potentiel éolien actuel

La validation de la méthode de reconstitution du potentiel éolien étant effectuée sur quelques points, on peut donc passer à l'étape du calcul du potentiel éolien actuel, par grand froid, sur l'ensemble de la Bretagne. Ce travail nécessite une partie préalable de regroupement des parcs en fonctionnement début 2011 que l'on nommera « méthode des grappes ». Ensuite, nous introduirons la base de calcul du potentiel éolien en points de grille à l'aide d'un pourcentage de puissance maximale disponible installée. Enfin, à l'aide des dates sélectionnées dans la deuxième partie de cette étude, nous pourrions estimer le potentiel éolien breton par grand froid.

3.4.1. Regroupement de parcs (méthode des grappes)

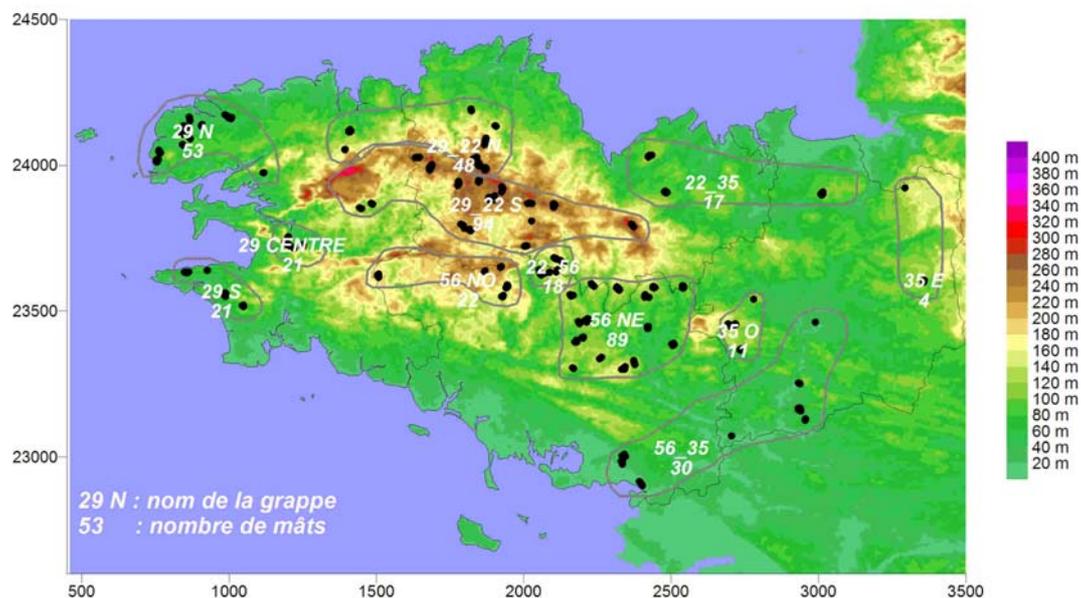
Nous travaillons uniquement avec les éoliennes effectivement construites début 2011 ; cette information nous est fournie dans le fichier mis à disposition par le Conseil Régional de Bretagne (coordonnées géographiques, puissance de chaque parc, état de construction).

Dans une première étape, les éoliennes sont regroupées en 12 zones en fonction du relief et des caractéristiques climatiques (voir carte suivante). Le relief utilisé est renseigné aux points d'une grille de maille 250 mètres (les altitudes figurant dans le fichier fourni par le Conseil Régional de Bretagne ne sont pas exploitées, certaines d'entre elles étant douteuses).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Eoliennes construites en Bretagne début 2011

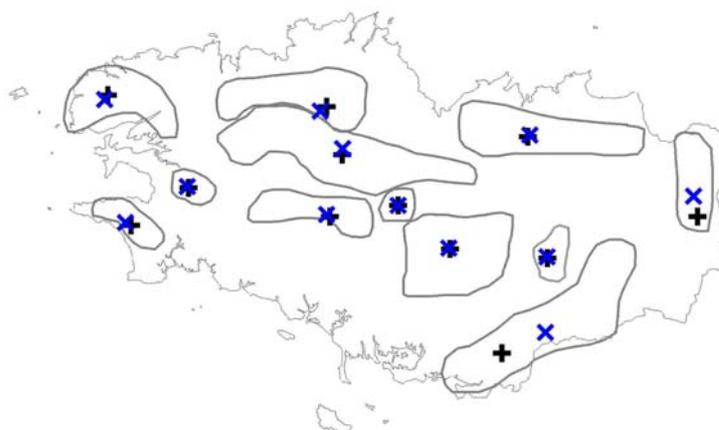
Contours des grappes (douze)



Carte 3.4 : éoliennes construites en Bretagne début 2011 regroupées en grappes

La deuxième étape consiste à déterminer un point représentatif pour chaque grappe. Plusieurs options se présentent, par exemple le point représentatif peut être le centre de gravité en termes de puissances en mégawatts des mâts constituant la grappe ou bien le centre de gravité en termes d'altitudes en mètres (...). Ces deux options citées ci-dessus sont testées et donnent des résultats très similaires (voir la carte suivante).

Grappes des éoliennes bretonnes (août 2011)

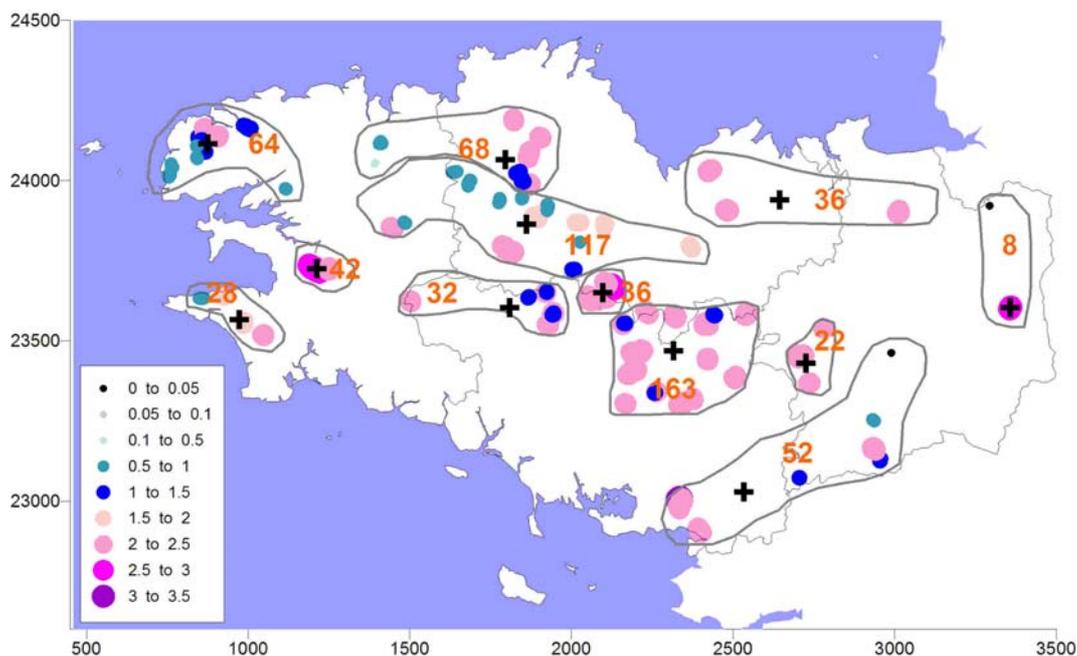


+ centres de gravité en fonction de la puissance
x centres de gravité en fonction de l'altitude

Carte 3.5 : exemples de points représentatifs des grappes d'éoliennes, en fonction de l'altitude (en bleu) ou en fonction de la puissance (en noir)

Le résultat s'appuyant sur la puissance des éoliennes est privilégié (croix noires sur la carte suivante). La puissance affectée au point représentatif est égale à la somme des puissances de chaque éolienne composant la grappe (nombres en orange sur la carte ci-après).

Grappes des éoliennes construites en BRETAGNE début 2011
Centres de gravité définis en fonction de la puissance



Puissance totale des grappes (en MW)

+ centres de gravité en fonction de la puissance

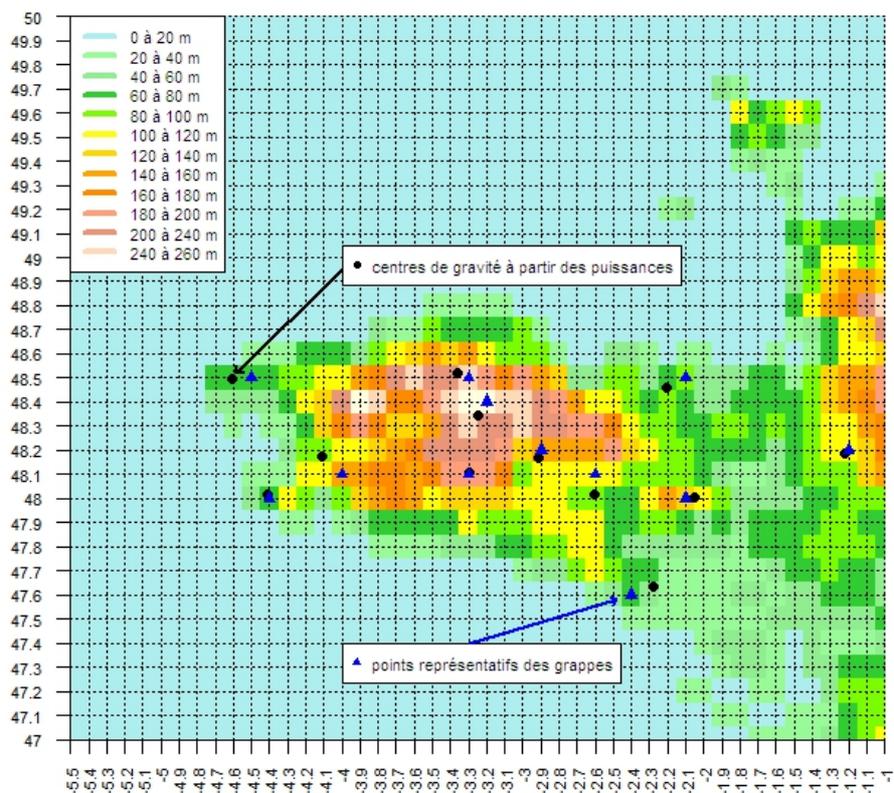
Carte 3.6 : points représentatifs des 12 grappes d'éoliennes en Bretagne obtenus à partir des puissances et puissance totale de chaque grappe

La troisième étape permet d'affiner la position des points représentatifs.

De même que les éoliennes sont plutôt installées sur des sites en altitude, les points représentatifs doivent également être situés préférentiellement sur des crêtes. Ce n'est pas nécessairement le cas des actuels points représentatifs qui ont été calculés géométriquement sans tenir aucun compte de leur environnement géographique.

Par la suite, le potentiel éolien étant estimé à partir des vents du modèle ALADIN, la position des points représentatifs est calée, non pas à partir du relief de définition 250 mètres, mais à partir du relief simplifié ALADIN. Pour chaque centre de gravité obtenu à partir de la puissance des éoliennes à la deuxième étape (points noirs sur la carte suivante) on choisit le point ALADIN le plus proche situé sur une crête (triangles bleus sur la carte suivante).

relief ALADIN



Carte 3.7 : relief ALADIN, centres de gravité à partir des puissances et points représentatifs des 12 grappes d'éoliennes en Bretagne

Remarque : comme déjà signalé précédemment, le relief du modèle ALADIN est simplifié ; ainsi par exemple, l'altitude maximale du modèle est de 255 mètres sur la Bretagne alors qu'avec le relief défini tous les 250 mètres l'altitude maximale est de 376 mètres.

Le tableau ci-après récapitule les caractéristiques de chaque grappe d'éoliennes

Zone grappe	Nombre de mâts	Puissance totale (MW)	Latitude (°) ALADIN représentatif	Longitude (°) ALADIN représentatif	Altitude (m) ALADIN représentatif
22 35	17	35.8	48.5	-2.1	82
22 56	18	35.5	48.2	-2.9	147
29 22 NORD	48	67.7	48.5	-3.3	237
29 22 SUD	94	116.7	48.4	-3.2	246
29 CENTRE	21	41.7	48.1	-4	143
29 NORD	53	63.7	48.5	-4.5	74
29 SUD	21	27.5	48	-4.4	68
35 EST	4	7.52	48.2	-1.2	115
35 O	11	22	48	-2.1	129
56 35	30	52.46	47.6	-2.4	65
56 NORD-EST	89	163	48.1	-2.6	116
56 NORD-OUEST	22	32	48.1	-3.3	198

Tableau 3.3 : tableau récapitulatif des caractéristiques des grappes d'éoliennes

3.4.2. Notion de pourcentage de puissance disponible

Pour estimer le potentiel de production électrique breton en s'affranchissant du type des machines installées, nous avons choisi de raisonner en terme de pourcentage de puissance disponible. Ainsi, nous utiliserons pour chaque point de grille (résolution 10 km) ou chaque point fictif d'implantation d'une grappe d'éoliennes, une courbe de puissance s'inspirant de celle de l'éolienne de référence Enercom E82 déjà détaillée précédemment. Les pourcentages correspondant à chaque classe de force de vent sont volontairement arrondis dans le tableau ci-après et seront utilisés comme références pour les parcs terrestres dans nos calculs.

Vitesse du vent en m/s	Pourcentage de la puissance maximale
1	0 %
2	0 %
3	1 %
4	4 %
5	9 %
6	16 %
7	27 %
8	40 %
9	60 %
10	80 %
11	90 %
12	100 %
13	100 %
14	100 %
15	100 %

Tableau 3.4 : correspondance entre les pourcentages de la puissance maximale et les classes de force de vent

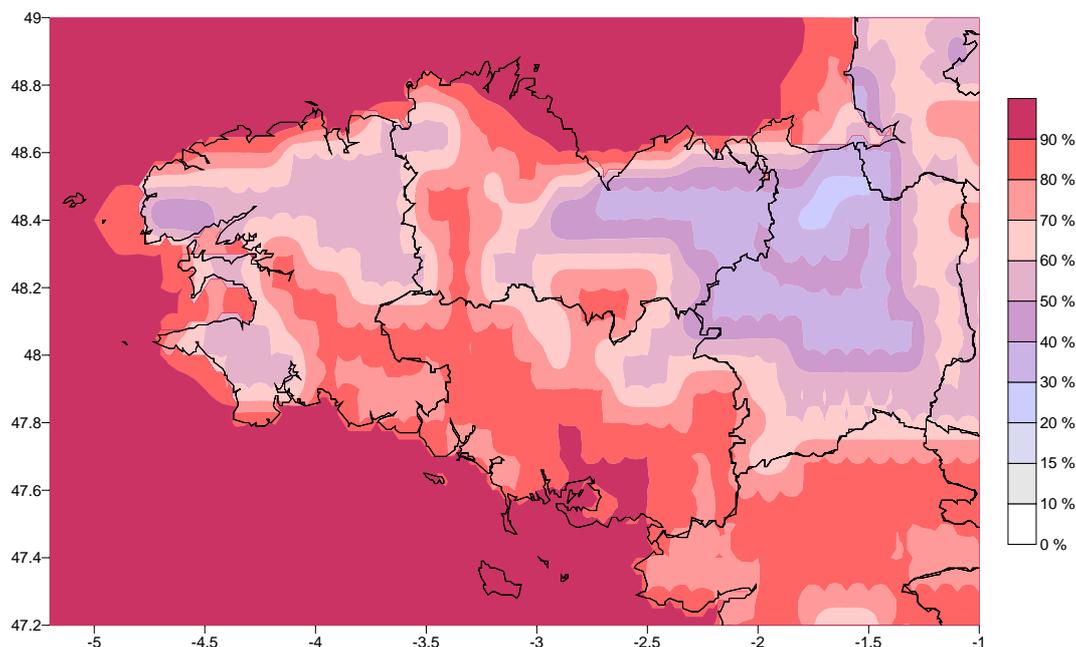
Pour les parcs en mer, nos recherches ont montré que les courbes de puissance en pourcentage avaient à peu près les mêmes profils que celles des machines terrestres. Les spécificités de ces machines « marines » sont axées optimisation de la maintenance et de la résistance aux embruns mais les courbes de puissance sont à peu près les mêmes que nos machines de référence terrestres. En revanche, les puissances maximales de chaque machine « off shore » tendent à croître rapidement (des modèles de 3 à 5 MW sont déjà disponibles sur le marché).

Ainsi, pour chaque point de grille un jour donné, sur terre comme sur mer, nous pouvons estimer le pourcentage de puissance disponible en « traduisant » les vents Aladin reconstitués sous forme de pourcentage comme ceux figurant dans la 2^e colonne du tableau précédent.

Cette méthode peut ensuite facilement être reproduite sur les grappes d'éoliennes définies au paragraphe 3.4.1. Nous obtenons alors, pour un jour et un créneau horaire donnés, une carte du pourcentage de puissance disponible (sur ces cartes, nous utilisons les vents Aladin à 50 mètres de hauteur sur terre et 100 mètres de hauteur sur mer). On trouvera ci-après deux exemples d'estimation du pourcentage de puissance maximale installée, choisis parmi les 152 situations de grand froid identifiées dans la deuxième partie. Le premier cas correspond à des vents soutenus le 7 mars 2010, le second à des vents beaucoup plus faibles le 31 janvier 2010.

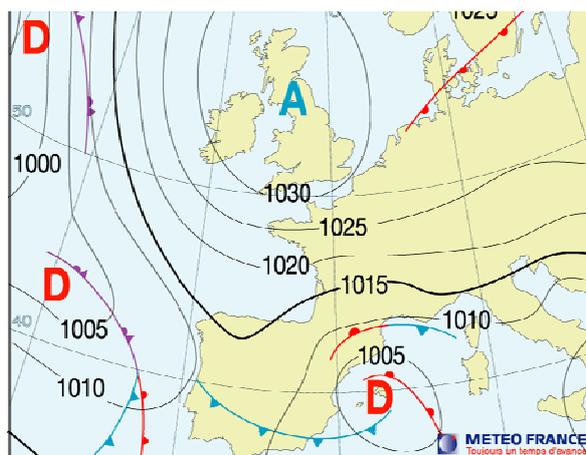
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

• Situation du 7 mars 2010 vers 8 heures



Carte 3.8 : estimation du pourcentage de puissance électrique disponible le 7 mars 2010 vers 8 heures du matin au moment d'un pic de froid

Ce jour-là, le vent est soutenu sur les côtes bretonnes au nord comme au sud. Il est un peu plus contrasté dans l'intérieur des terres, modéré à l'ouest et plutôt faible à l'est. Dans ces conditions, notre estimation montre que des éoliennes installées sur la côte nord ou en mer produirait 100 % de leur puissance maximale. En revanche, dans certaines zones en Ille-et-Vilaine, la production serait en dessous de 40 % de la puissance maximale installée. La finesse de l'analyse des vents Aladin permet de bien distinguer sur ce cas particulier les zones à faible production potentielle des zones à forte production potentielle. On rappelle qu'ici, on utilise le vent à 50 mètres sur terre et à 100 mètres sur mer.

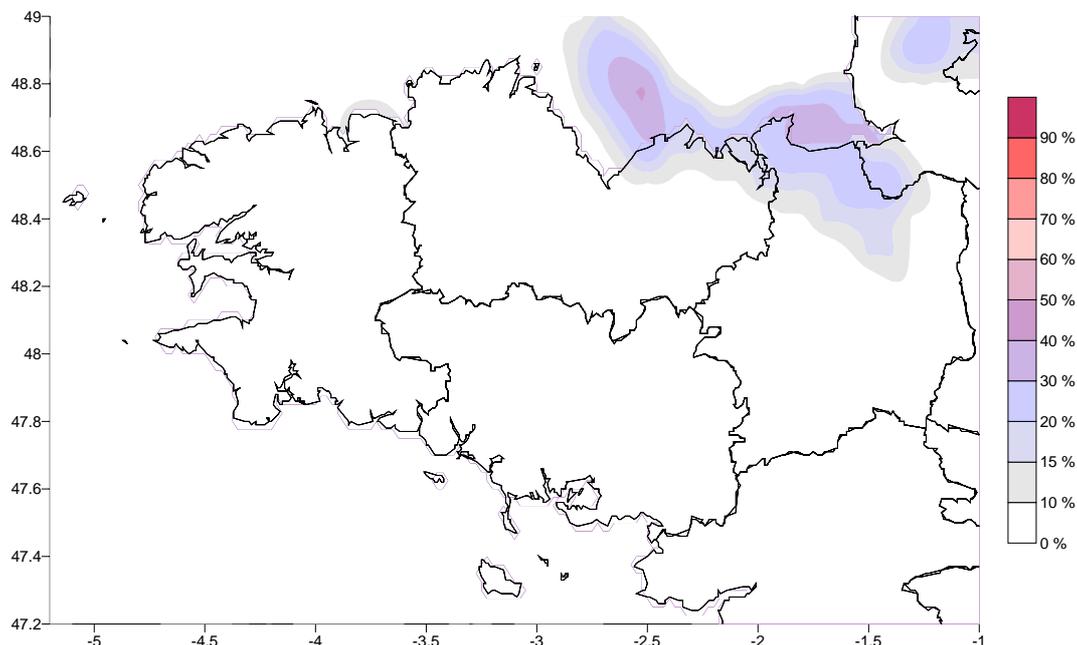


Carte 3.9 : situation météorologique le 7 mars 2010

Un puissant anticyclone à plus de 1030 hPa centré sur l'Ecosse dirige sur la Bretagne un flux d'est assez fort. Froid et vents soutenus cohabitent pour cette situation du 7 mars 2010.

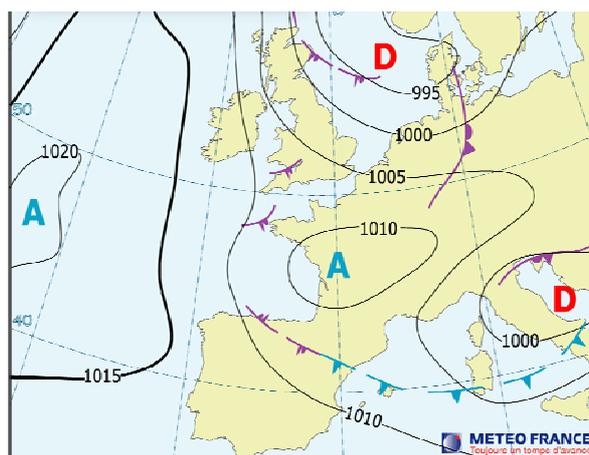
Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

- **Situation du 31/01/2010 à 08 heures**



Carte 3.10 : estimation du pourcentage de puissance électrique disponible le 31 janvier 2010 vers 8 heures du matin au moment d'un pic de froid

Le vent est faible sur l'ensemble de la Bretagne avec un potentiel quasi nul (moins de 20 % de la puissance installée). Ce jour-là, la production serait un peu plus favorable dans le secteur de la baie de St-Brieuc avec une production estimée de 20 à 40 % de la puissance maximale installée sur ce parc « off shore ».



Carte 3.11 : situation météorologique le 31 janvier 2010

Un anticyclone relatif est centré sur la France où toutes les pressions avoisinent les 1010 hPa. Une telle situation engendre peu de vent sur la Bretagne.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Les 152 cartes de pourcentage de puissance maximale disponible par grand froid, identiques dans leur conception aux deux présentées ici, sont fournies en annexe de ce rapport. Leur examen montre qu'elles représentent des situations météorologiques très variées avec parfois peu de vent, parfois du vent généralisé soutenu et parfois des situations plus contrastées.

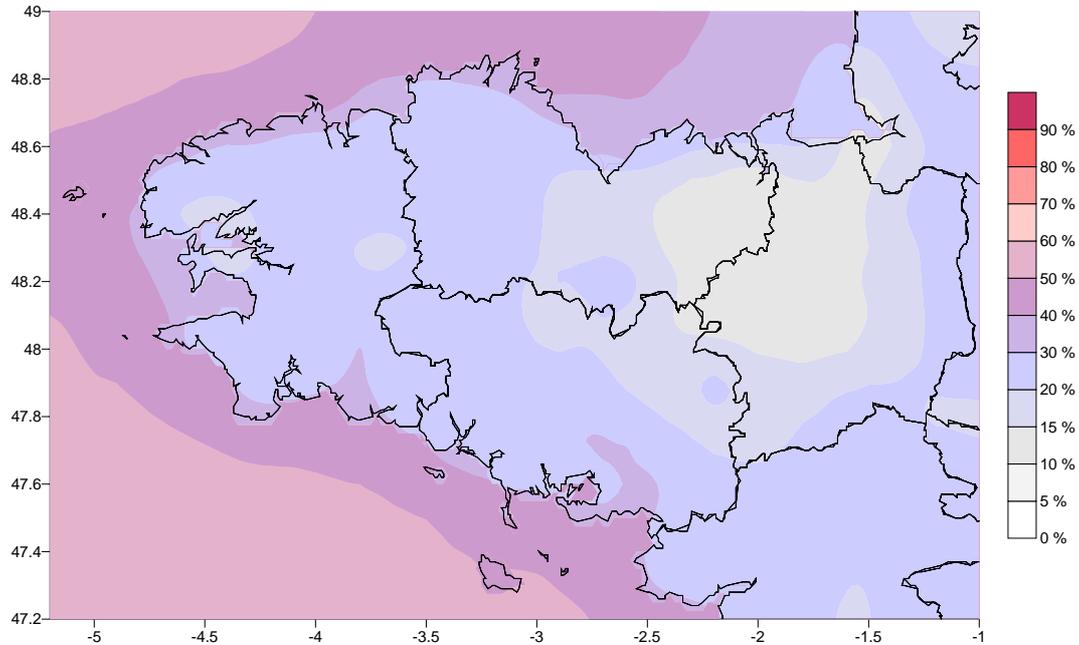
Ces cartes et les données qui les constituent permettront de refaire des calculs selon divers scénarios d'implantation des parcs d'éoliennes en Bretagne sur ce vaste échantillon de journées typiques de temps froid.



Cartes 3.12 : échantillon d'une partie des 152 cartes de pourcentage de puissance disponible

3.4.3. Potentiel éolien par grand froid : statistiques générales

Les cartes régionales de pourcentage de puissance disponibles sur les 152 épisodes de grand froid identifiés permettent de faire une estimation globale du potentiel éolien sur la Bretagne par grand froid. Pour cela, nous allons étudier quelques statistiques globales calculées sur la totalité de l'échantillon.



Carte 3.13 : pourcentage moyen de puissance maximale disponible (moyenne des 152 cartes)

En moyenne sur ces épisodes, des éoliennes installées en mer produiraient par situation de grand froid entre 30 et 50 % de leur puissance. Dans l'intérieur des terres, ce potentiel est de l'ordre de 15 % au Nord-Ouest de Rennes, il varie entre 20 et 30 % sur l'Ouest.

Pour autant, l'utilisation de cette carte de moyenne doit se faire avec prudence compte tenu de la dispersion de l'échantillon. Des éléments sont fournis à ce sujet dans les paragraphes suivants.

3.4.4. Analyse du potentiel actuel

Dans ce paragraphe, nous nous fondons uniquement sur les parcs éoliens terrestres en service début 2011.

En utilisant les données qui ont permis de tracer les 152 cartes introduites au paragraphe précédent et les caractéristiques des grappes d'éoliennes définies au paragraphe 3.4.1, on peut reconstituer une production électrique théorique bretonne pour chaque situation de grand froid. On obtient alors 152 valeurs de production électrique sur lesquelles nous pouvons calculer des indicateurs statistiques caractéristiques (en MW) de la puissance réelle fournie par les éoliennes lors de ces pics de froid.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

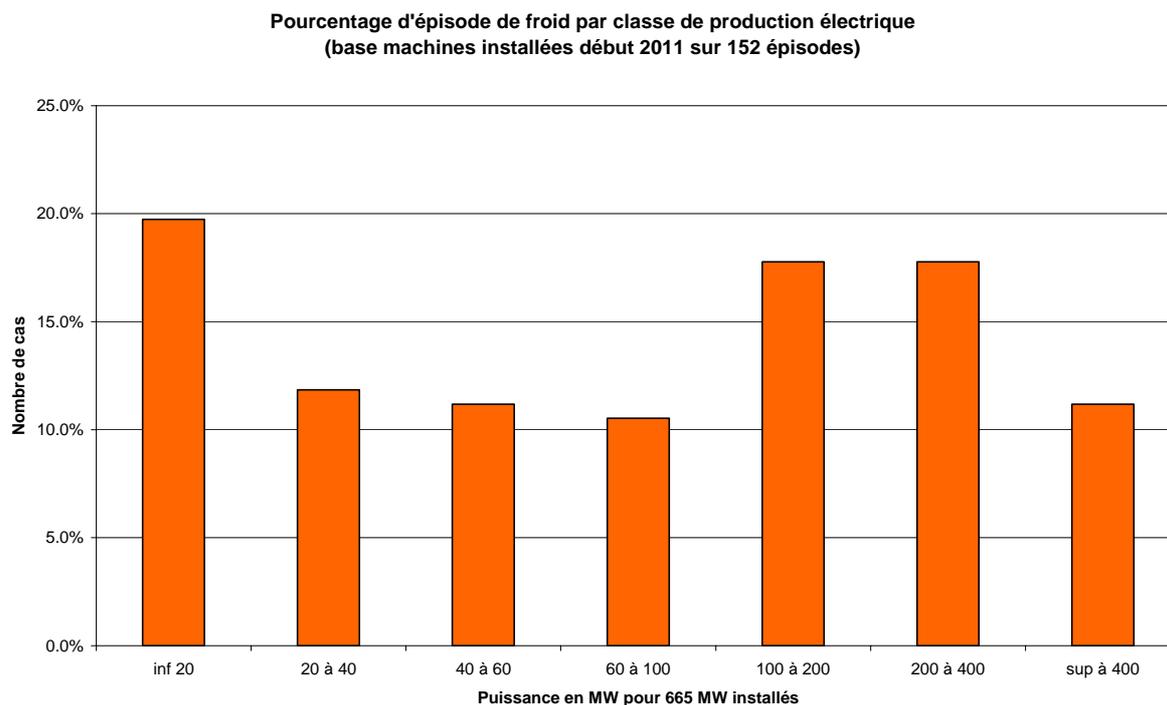
moyenne	149 MW
médiane	88 MW
Q10	44 MW
Q90	176 MW

Tableau 3.5 : statistiques descriptives de l'échantillon de puissance instantanée terrestre 2011

Les Qxx correspondent aux percentiles 10 et 90 %.

La population n'est pas gaussienne avec une forte dissymétrie à gauche. Si la moyenne de 149 MW est assez élevée, elle est peu instructive et masque un nombre important de situations de grand froid pendant lesquelles la production éolienne terrestre est faible. Ainsi, une fois sur deux, elle est inférieure à 88 MW, soit à peine 15 % de la puissance installée (665 MW au 01/01/2011).

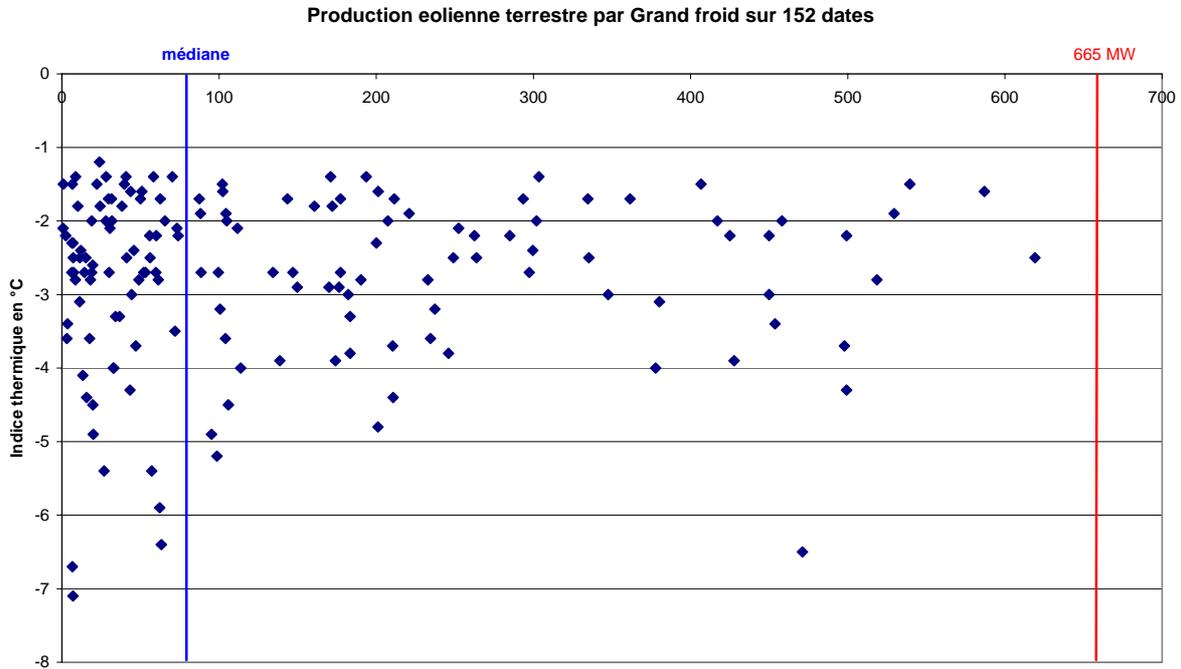
Cependant, le graphique ci-après montre que le nombre de situations de grand froid pour lesquelles la production éolienne terrestre est significative est non négligeable : dans 29 % des cas, soit 44 situations sur 152, la production est supérieure à 200 MW par grand froid en Bretagne.



Graph 3.5 : pourcentage du nombre d'épisodes de froid par classe de production instantanée associée (production instantanée en MW)

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

On s'intéresse maintenant à la production en fonction de l'intensité du froid (indice thermique introduit dans la deuxième partie au paragraphe 2.2.1). La figure ci-après donne une bonne indication de la dispersion de l'échantillon de valeurs.



Graphie 3.6 : production éolienne terrestre en Bretagne par grand froid sur la base des 665 MW installés début 2011

On retrouve une majorité de points dans le coin supérieur gauche de la figure. Ils traduisent l'existence de nombreuses situations de froid « modéré » (avec indice thermique compris entre -1 et -3 ou -4 °C) sans vent, donc sans production éolienne terrestre significative. A droite, les 665 MW correspondent à ce que la Bretagne produirait si le parc tournait à plein régime (donc avec un vent soutenu partout en même temps). Ces conditions ne se sont pas produites sur les épisodes de grand froid étudiés (mais approchées avec 619 MW qui auraient été produits le 07/01/2003 au soir).

Quelques situations de froid intense (indice thermique inférieur à -3 °C) sont associées à des vents et donc à une production électrique significative.

3.5. Estimation du Potentiel éolien futur par grand froid

Sur la base de nos 152 épisodes de froids (échantillon jugé représentatif du climat breton, cf. partie 1 de l'étude), nous pouvons maintenant aborder la phase prospective en étudiant le potentiel de production électrique à partir des fermes éoliennes en projet à la fois sur terre et sur mer. On rappelle que notre estimation est établie à partir des machines en projet sur la période 2011/2020 en prenant l'hypothèse qu'on aurait le même échantillon de situations météorologiques que celui de la période de référence 2001/2010 (un éventuel changement des distributions des régimes de temps n'est donc pas pris en compte).

3.5.1. Apport des parcs terrestres en projet

Dans cette partie, nous utilisons une hypothèse simple de doublement et de triplement du parc breton actuel sur des zones identiques aux implantations actuelles.

Il suffit donc de multiplier les énergies électriques obtenues au paragraphe précédent pour obtenir un ordre de grandeur de la production par grand froid.

	665 MW installés en 2011	Hypothèse double	Hypothèse triple
moyenne	149	300	450
médiane	88	170	250
Q10	44	90	130
Q90	176	350	530

Tableau 3.6 : éléments statistiques de l'échantillon de production estimée en MW sur 152 dates

La production terrestre par grand froid pourrait donc dépasser 250 MW une fois sur deux selon l'hypothèse de triplement du parc installé en 2011 à l'horizon 2020. Cette hypothèse s'appuie sur un scénario de densification des machines au sein des grappes d'éoliennes définies au début de la partie 2.

Les valeurs ont été volontairement arrondies dans ce tableau pour bien montrer qu'il s'agit d'un ordre de grandeur basé sur des hypothèses simples.

L'étude plus précise des implantations terrestres prévues n'a pu être réalisée dans le cadre de cette étude. Il n'est pas certain qu'elle apporte des différences fondamentales par rapport aux ordres de grandeur fournis ici. Ce tableau peut être facilement dupliqué, pour des scénarios intermédiaires ou à d'autres échéances, en utilisant une simple règle de trois.

3.5.2. Apport potentiel des fermes « off shore »

On utilise ici les deux parcs « off shore » en projet (l'un en baie de St-Brieuc et l'autre au large de Guérande). Ces parcs sont assimilés à un seul point de référence dans nos calculs compte tenu de l'homogénéité du vent dans ces zones maritimes.

A ces parcs dont les appels d'offre sont imminents à la date de rédaction de ce rapport, on ajoute le projet vraisemblable d'un parc d'éoliennes flottantes au sud de l'Ile de Groix.

Les calculs sont effectués sur la base d'une puissance de 500 MW sur chaque parc. On trouvera ci-après les statistiques globales des échantillons de 152 productions électriques correspondant aux épisodes de grand froid.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

Les Qxx correspondent aux percentiles 10, 20, 80 et 90 %.

	Parc baie St-Brieuc	Parc Guérande	Parc sud de Groix	Somme des 3 parcs
moyenne	210	246	229	685
médiane	135	200	135	548
Q10	5	45	20	106
Q20	20	80	45	185
Q80	450	450	450	1 300
Q90	500	500	500	1 450

Tableau 3.7 : statistiques de la production électrique « off shore » instantanée en MW
sur 152 épisodes de grand froid

Vue la forte dissymétrie des distributions, les moyennes ne sont pas des indicateurs très représentatifs, on raisonnera donc plutôt sur les médianes et percentiles.

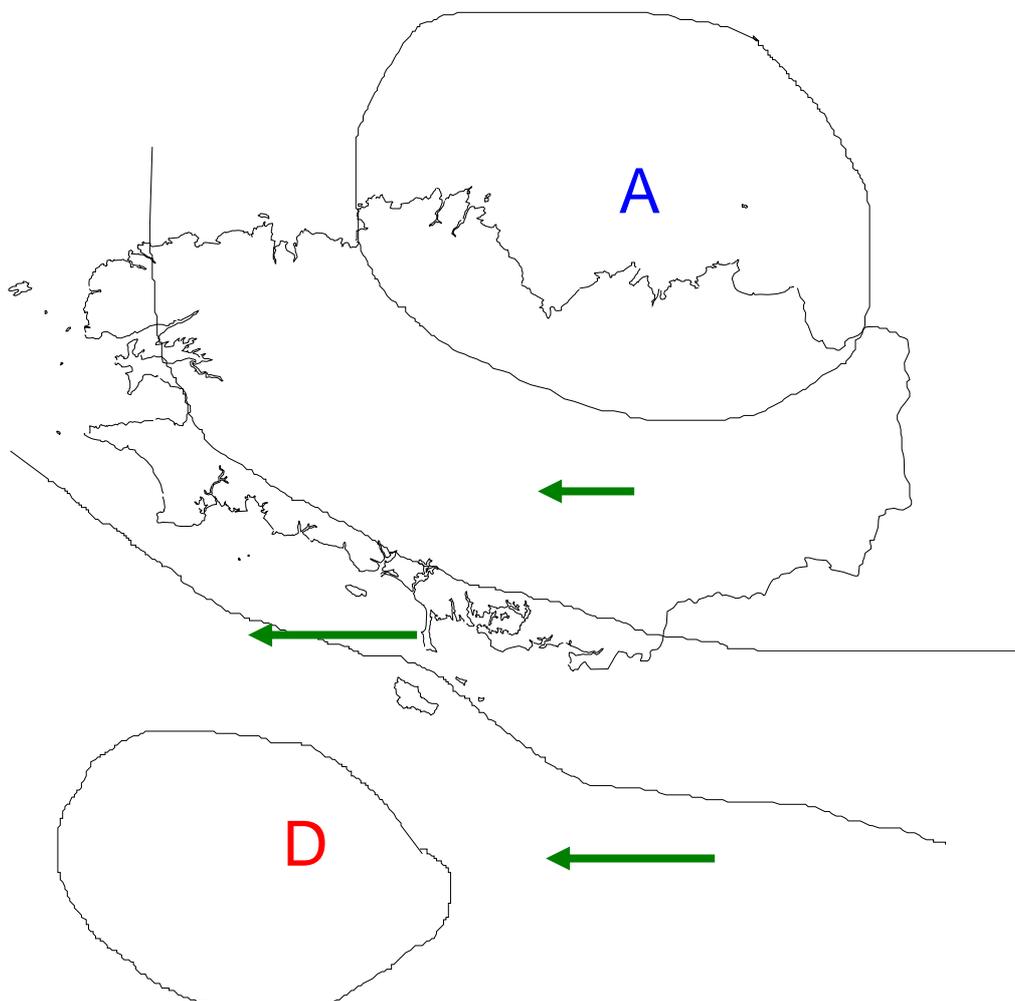
On constate tout d'abord que le parc de Guérande a plus de potentiel de production que le parc de la baie de St-Brieuc et que celui de Groix sud. En d'autres termes, par temps froid le vent souffle plus régulièrement sur l'estuaire de la Loire qu'en Manche ou au sud de Groix.

Ces parcs éoliens « off shore » ont bien évidemment un potentiel de production beaucoup plus intéressant que les parcs terrestres par grand froid.

Du fait de leur éloignement géographique, ces parcs peuvent se révéler assez complémentaires. Si par exemple le parc de Guérande ne produit pas grand-chose, le vent peut souffler plus sensiblement sur un autre parc, ce qui assure quand même une production minimale significative liée à la puissance installée. Cette complémentarité est illustrée par le fait que sur notre échantillon, les médianes, les percentiles Q10 et Q20 calculés sur la somme des parcs sont supérieurs à la somme de ces indicateurs calculés sur chaque parc. Elle se manifeste beaucoup moins par vent fort puisque quand celui-ci est soutenu, il souffle sur l'ensemble de la Bretagne.

On trouvera ci-après une situation météorologique fictive illustrant cet effet de compensation par vent faible ou modéré.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



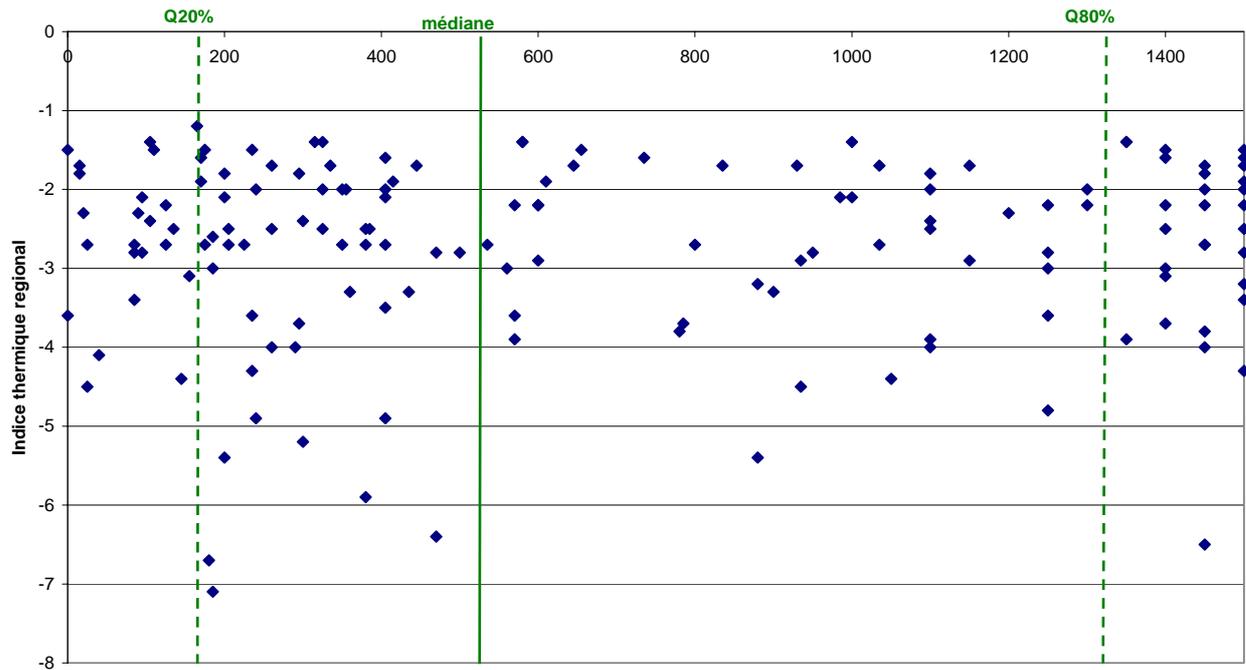
Graph 3.7 : exemple de situation météorologique fictive mais réaliste associée à un grand froid

Dans ces conditions, le vent d'Est est modéré sur le sud Bretagne, faible dans l'intérieur des terres et nul en baie de St Brieuc au centre de l'anticyclone. Pour que le vent soit nul sur l'ensemble de la région, il faudrait que les hautes pressions soient centrées sur la Bretagne et que l'anticyclone soit assez étendu, ce qui est relativement rare.

Néanmoins, malgré la prise en compte de 3 parcs, la production totale reste inférieure à 180 MW près d'une fois sur cinq. Elle atteint environ 550 MW près d'une fois sur deux (soit plus de 30 % du parc de 1 500 MW pris en compte ici). Cette production éolienne « off shore », par grand froid, dépasse 1 300 MW une fois sur cinq. (soit plus de 80 % de la puissance prise en compte ici).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid

En représentant graphiquement les productions simulées en fonction de l'indice thermique régional, on constate que le nuage de points pour les fermes « off shore » est beaucoup plus équilibré que celui présenté pour les fermes terrestres. Ainsi, les situations de temps froid associées à un vent soutenu en mer sont assez fréquentes et représentent près d'un cas sur trois. Ces situations à forte production électrique se répartissent de façon assez homogène que le froid soit vif ou non. On remarque un nombre à peu près équivalent de situations de froid intense (indice thermique inférieur à $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) de part et d'autre de la médiane de puissance (550 MW).

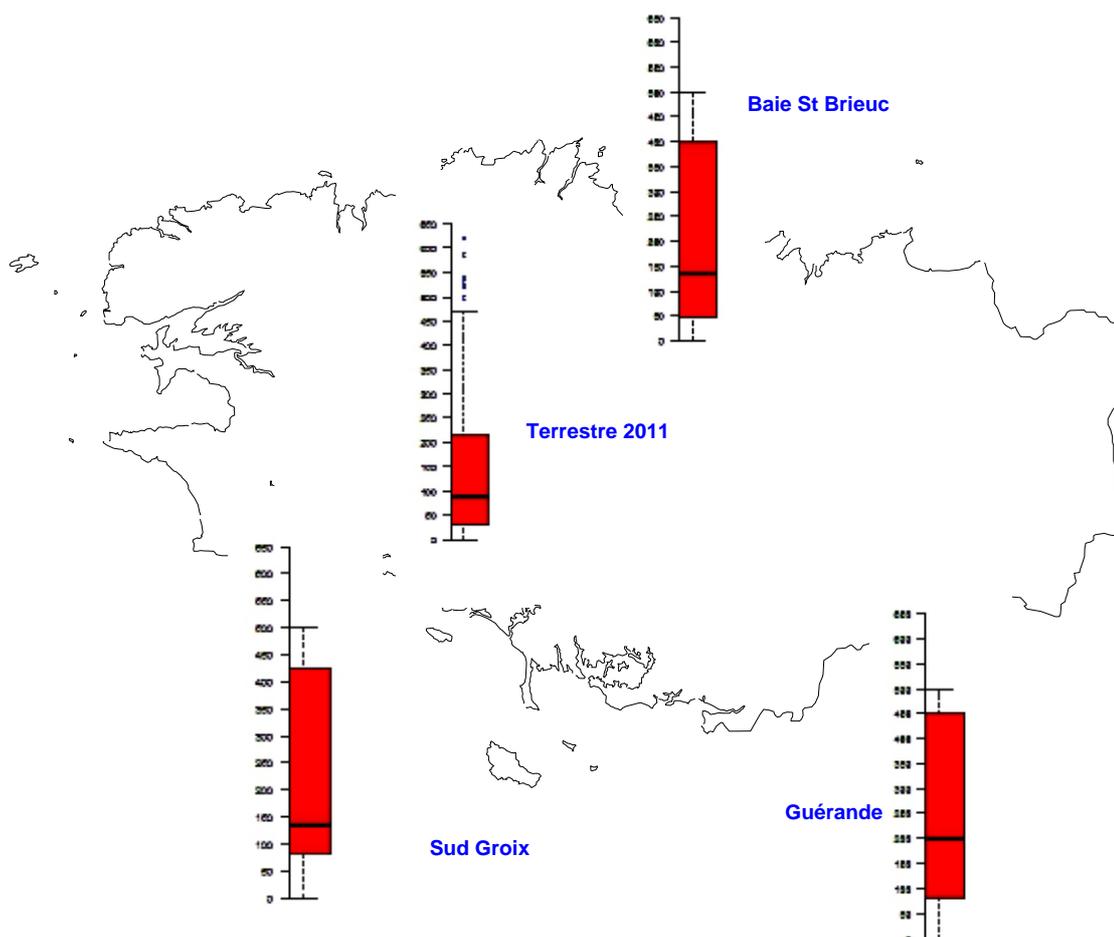


Graphique 3.8 : indice thermique régional en $^{\circ}\text{C}$ et production « off shore » en MW sur 152 épisodes de grand froid

3.5.3. Synthèse globale

On trouvera ci-après une carte synthétisant la puissance électrique instantanée correspondant aux 152 épisodes de grand froid identifiés. Pour garder une certaine clarté à cette carte, nous n'avons pas pris en compte les scénarios de doublement et triplement du parc terrestre.

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



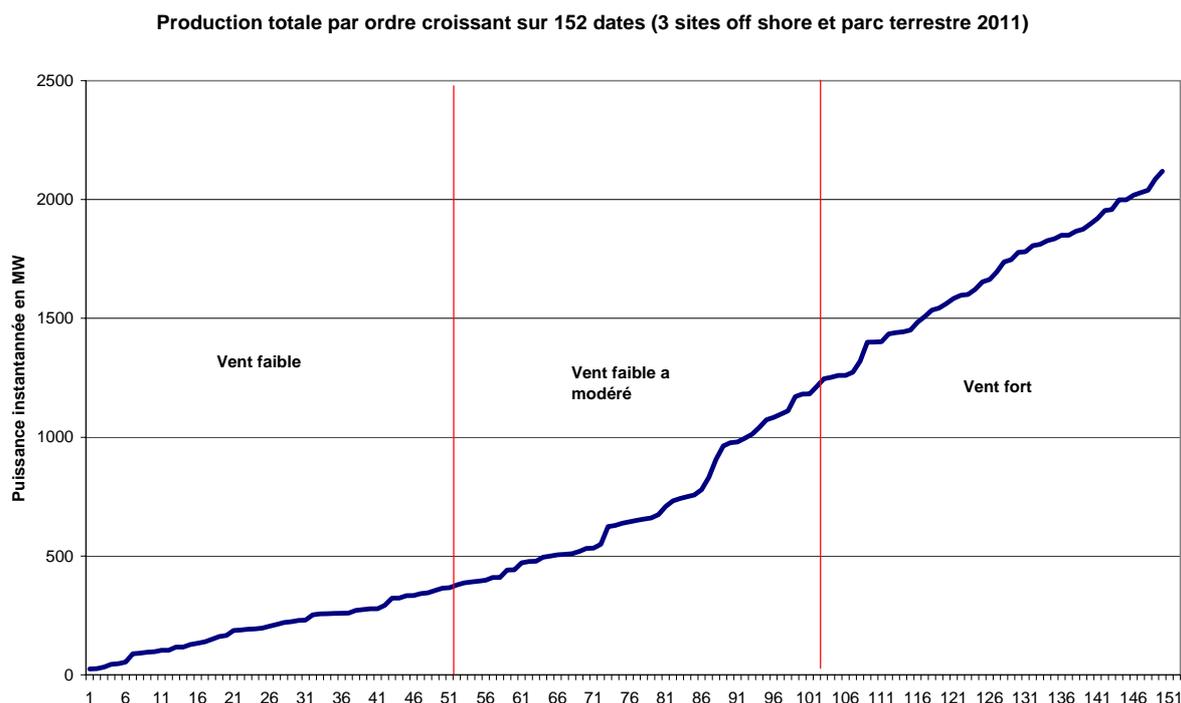
Carte 3.14 : dispersion de la puissance instantanée par grand froid incluant le parc terrestre de 2011 et les différents projets « off shore »

La représentation sous forme de « boîte à moustaches » est standard. La médiane est indiquée par la barre noire du milieu, les quintiles Q25% et Q75% délimitent l'aire rouge. Les barres extrêmes correspondent à $Q75\% + 1.5*(Q75-Q25)$ et à $Q25\% - 1.5*(Q75-Q25)$

3.5.4. Lieux d'implantation avec le meilleur potentiel

Le calcul de différents percentiles sur les 152 cartes de référence est théoriquement possible mais se révèle délicat à comprendre ou expliquer. Il ne peut se faire que par un calcul de percentiles sur l'ensemble des points de grille avec interpolation spatiale des résultats obtenus. Pour faciliter la compréhension, nous avons préféré déterminer les percentiles en classant la production totale estimée sur 152 dates par ordre croissant. On tient compte ici des éoliennes terrestres implantées début 2011 et des 3 projets « off shore » décrits précédemment. Le graphique ci-après permet de séparer la population en 3 terciles (associés à du vent faible, modéré ou fort).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



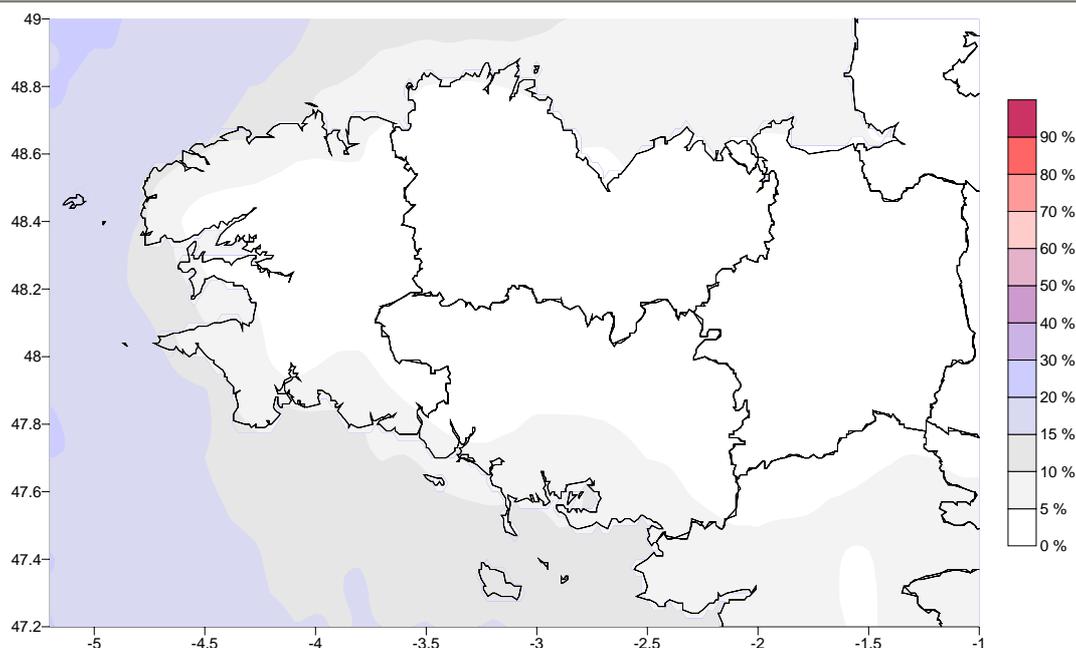
Graph 3.9 : production estimée en MW sur les 152 dates classées par ordre croissant sur les 3 sites « off shore » et le parc terrestre 2011

A gauche, on retrouve les situations avec un potentiel de production quasi nul (par exemple le 01/02/2006 et le 31/01/2010 au matin). A droite du graphique se trouvent les jours froids les plus favorables avec plus de 2 000 MW de production (par exemple le 07/01/2003 au soir et le 19/02/2003 au matin).

Avec les plus bas indices thermiques ($-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ), on peut avoir deux cas de figure, une production faible de 180 MW le 10/01/2009 au matin, ou forte de 1 450 MW le 09/01/2003.

Après analyse de l'échantillon, nous présentons ci-après la carte du potentiel moyen des 50 dates les moins ventées (soit le 1/3 inférieur de l'échantillon de puissance instantanée totale).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



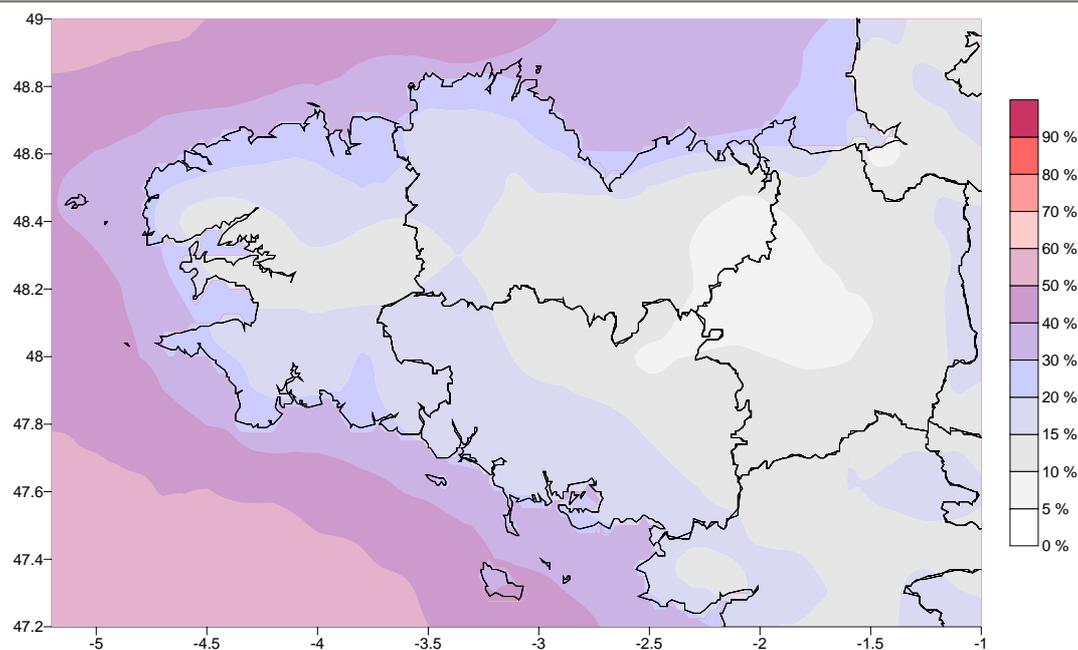
Carte 3.15 : potentiel moyen de production en % de la puissance qui serait installée sur les 50 dates les plus défavorables

Cette carte indique la production électrique potentielle moyenne, par grand froid lorsque le parc éolien pris en compte produit peu. Pour l'augmenter, il faudrait privilégier des installations de machines sur les côtes du Finistère, en mer d'Iroise et dans une moindre mesure sur le sud de la Bretagne. Dans ces zones les plus favorables, par grand froid quand le vent est faible, le potentiel de production reste assez modeste avec 10 à 20 % de la puissance installée.

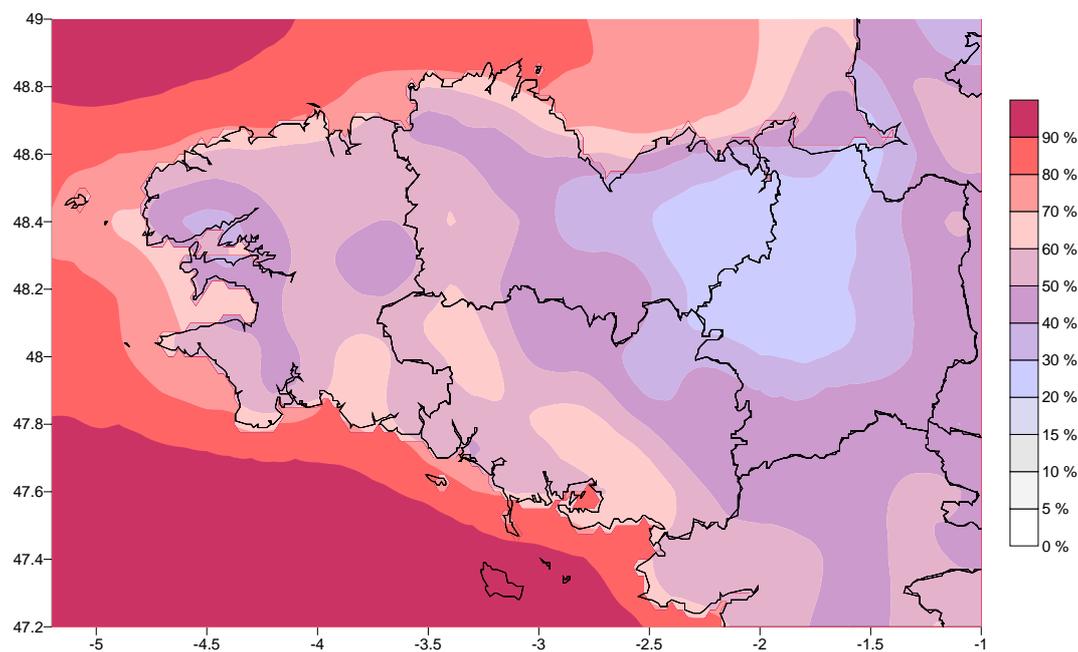
Cet argument n'évoque que des critères climatiques, il y a évidemment bien d'autres contraintes qui entrent en compte lors de la planification de telles installations.

On trouvera ci-après les cartes de production totale correspondant aux 2^e et 3^e terciles (associés respectivement à des vents modérés puis forts).

Apport de l'éolien breton pour la production électrique en périodes de grand froid



Carte 3.16 : potentiel moyen de production en % de la puissance qui serait installée sur les 51 dates correspondant au 2^e tercile (vent moyen)



Carte 3.17 : potentiel moyen de production en % de la puissance qui serait installée sur les 51 dates correspondant au 3^e tercile (vent fort)

Pour ces deux derniers terciles, le potentiel de production se trouve dans l'Ouest et le Sud de la région Bretagne.

3.6. Conclusion et perspectives

Cette étude du potentiel éolien breton par grand froid aura permis de donner des éléments sur les productions attendues, y compris en incluant les projets terrestres et maritimes d'ici l'horizon 2020. Elle s'appuie sur des hypothèses simples mais réalistes, ses résultats doivent donc être interprétés uniquement en termes d'ordre de grandeur.

Parmi les résultats les plus significatifs, on retiendra que par grand froid, on peut estimer une production le plus souvent faible des parcs terrestres bretons. Cependant cette production est parfois significative : une fois sur trois la production terrestre est supérieure à 30 % de la puissance installée, ce qui est loin d'être négligeable. Les ordres de grandeur de la production attendue des parcs « off shore » sont évidemment bien supérieurs. Une fois sur deux par grand froid, ceux-ci produiraient plus de 1/3 de leur puissance instantanée cumulée avec des effets de compensation intéressants entre certains parcs.

Enfin, l'analyse fine des épisodes de froid les moins ventés montrent que la puissance instantanée totale de la Bretagne serait améliorée si l'on pouvait installer des machines supplémentaires plutôt à l'Ouest du Finistère.

On pourrait bien entendu affiner les estimations ici réalisées en prenant en compte :

- les différentes hypothèses sur les courbes de puissance des éoliennes de référence ;
- les caractéristiques et emplacements précis des machines réelles installées ou en projet ;
- l'effet de refroidissement éolien (« Windchill ») sur les bâtiments et donc sur la consommation électrique ;
- un modèle météorologique reconstituant le vent à plus fine échelle ;
- d'autres paramètres météorologiques comme la densité de l'air ou la turbulence ;
- etc.

La prise en compte de ces éléments donnerait probablement des résultats différents mais pas forcément contradictoires en termes d'ordre de grandeur.

Enfin, il faut rappeler que les résultats sont obtenus en admettant l'hypothèse de climat constant (les 152 dates sont représentatives du climat des 30 dernières années et aussi du climat futur proche). La science ne permet pas encore de faire des simulations fiables de vent pour les prochaines décennies en intégrant l'augmentation du taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Si c'est le cas un jour, ces éléments seront intéressants à confronter à nos résultats.