

Aspects méthodologiques et historiques des tempêtes et des chablis

Synthèse des conditions météorologiques lors des tempêtes de décembre 1999

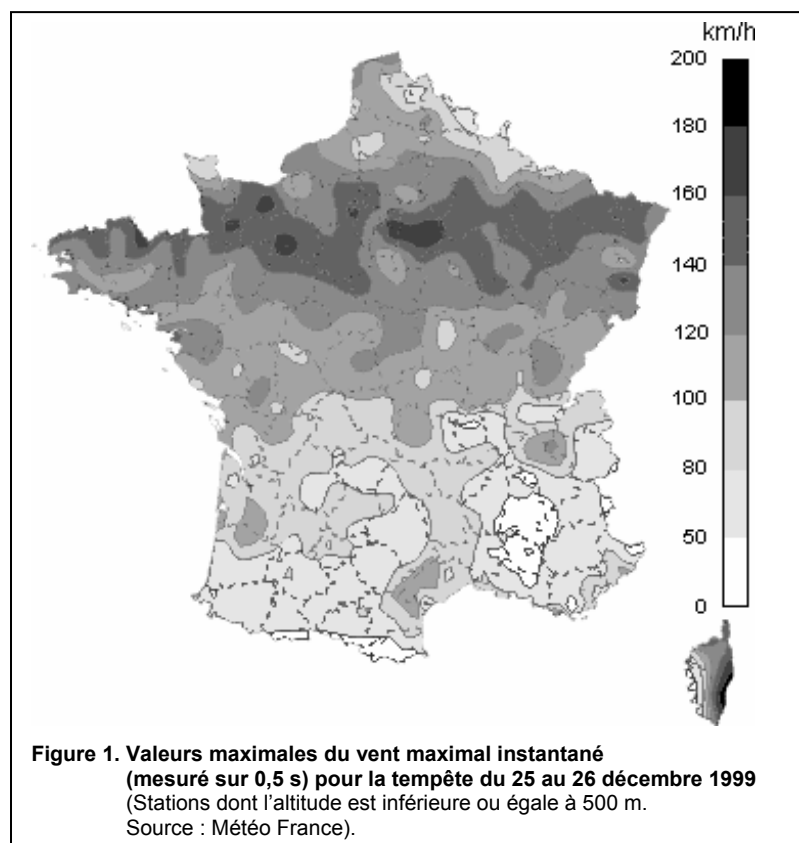
par Pierre Bessemoulin

Météo – France
SCEM/CBD/D 42, av. Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse
pierre.bessemoulin@meteo.fr

Les faits

Des vents d'une violence exceptionnelle ont accompagné la très profonde dépression (960 hPa à 7 h 00 aux environs de Rouen) qui a traversé de part en part et très rapidement le nord du pays dimanche matin 26 décembre 1999. La trajectoire de cette dépression suit d'ouest en est une ligne approximative le long du 49° parallèle. Cette dépression, qui touche le Finistère le 26 décembre vers 2 h locales, se situe sur Strasbourg aux environs de 11 h ; elle s'est donc déplacée à environ 100 km/h.

Les vents les plus violents (fig.1) ont balayé une bande d'une largeur de 150 km environ à proximité immédiate de la dépression, tout le long de cette trajectoire,



côté sud, sur un axe pointe de Bretagne - sud de la Normandie - Île-de-France - Champagne-Ardenne - Lorraine - Alsace puis Allemagne.

Outre les vents exceptionnellement forts mesurés dans l'intérieur des terres, cette tempête est exceptionnelle par le creusement de la dépression qui s'est accentué sur terre, en raison probablement d'une interaction forte avec les courants jets d'altitude qui étaient supérieurs à 400 km/h à 9 000 m d'altitude. Le 27 décembre à 0 h, le radiosondage de Brest a même mesuré une vitesse du vent record de 529 km/h à l'altitude de 8 138 m.

Quelques valeurs de rafales de vents mesurées :

Ploumanac'h	148 km/h	Île de Groix	162 km/h	Rennes	126 km/h
Nantes	126 km/h	Alençon	166 km/h	Rouen	140 km/h
Chartres	144 km/h	Paris – Montsouris	169 km/h	Orly	173 km/h
Troyes	148 km/h	Dijon	126 km/h	Metz	133 km/h
Nancy	155 km/h	Colmar	155 km/h	Strasbourg	144 km/h

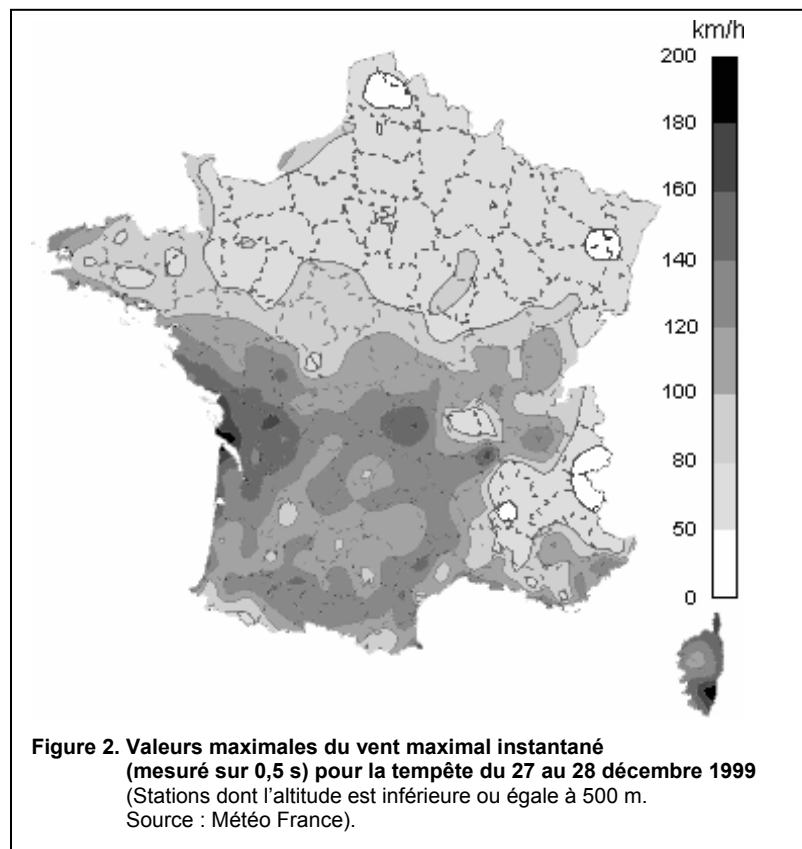
La deuxième dépression a traversé le sud du pays de l'après-midi du lundi 27 décembre à la nuit de lundi 27 à mardi 28 décembre à une vitesse proche de 100 km/h. Elle s'est creusée en matinée du lundi 27 au large de la Bretagne, a atteint en son centre 965 hPa en entrant sur la pointe sud de la Bretagne vers 16 h locales. La trajectoire a suivi une ligne : Nantes vers 19 h locales, puis Romorantin vers 22 h locales, Dijon vers 1 h du matin le mardi 28, Alsace vers 4 h du matin. La dépression s'est ensuite évacuée vers l'est.

Des vents exceptionnellement violents ont accompagné cette dépression, avec des forces maximales sur sa partie ouest et sud (fig. 2). Les régions les plus touchées ont été d'abord le sud de la Bretagne et les côtes Atlantiques dans l'après-midi,

puis toutes les zones situées au sud d'une ligne La Rochelle - Mâcon, y compris la côte méditerranéenne, en particulier varoise, et la Corse où le vent continuait à souffler en tempête le matin du mardi 28. En Corse, des vagues très fortes ont touché la face occidentale.

Quelques valeurs de rafales de vent observées la journée du 27 et la nuit du 27 au 28 :

Pointe du Raz	162 km/h	Île d'Yeu	162 km/h	Île d'Oléron	198 km/h
La Rochelle	151 km/h	Biscarosse	166 km/h	Cap-Ferret	173 km/h
Bordeaux	144 km/h	Pau	140 km/h	Tarbes	137 km/h
Limoges	148 km/h	Aurillac	137 km/h	Perpignan	140 km/h



Clermont-Ferrand

159 km/h

Mâcon

126 km/h

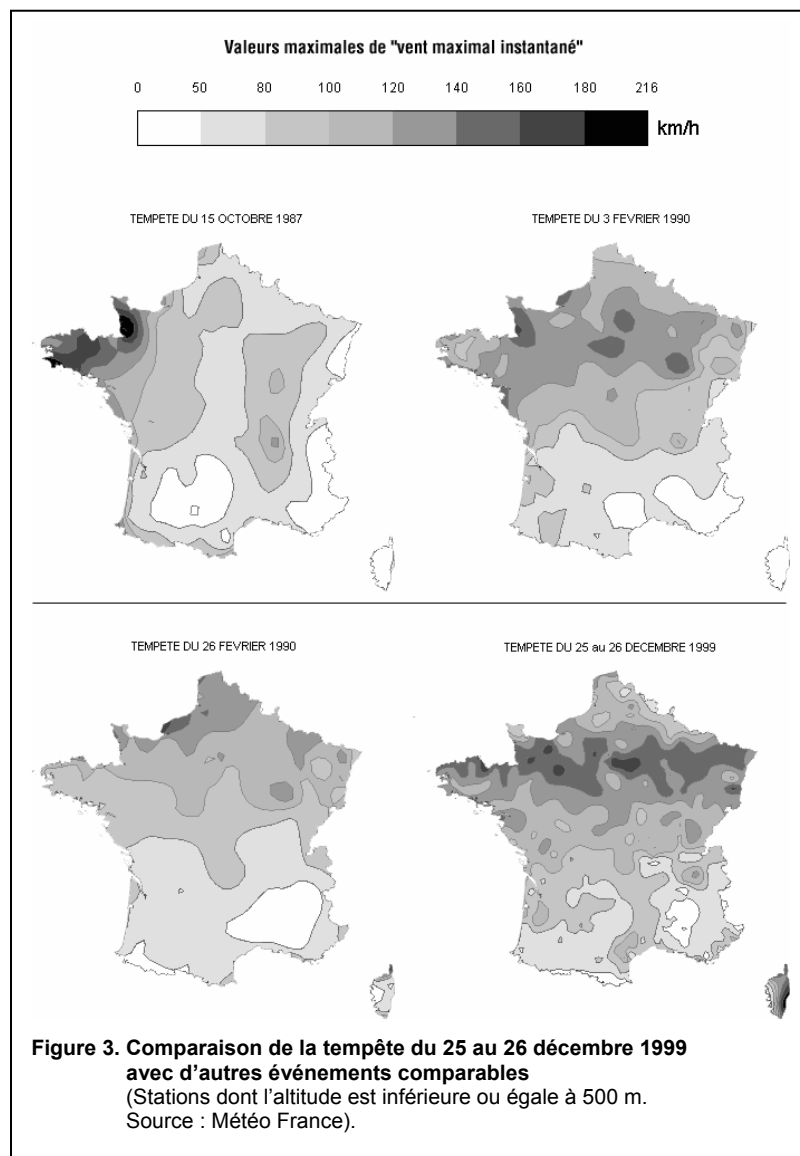
Quelles sont les raisons de ces conditions inhabituelles sous nos latitudes ?

A l'échelle du bassin Atlantique et de l'Europe, la première raison est l'extension d'un courant-jet jusqu'au-dessus de l'Allemagne, en ligne droite depuis la côte est de l'Amérique. En général, le courant-jet s'étale (diffuse) vers 10° de longitude ouest. De plus, ce courant d'ouest est d'une intensité elle aussi exceptionnelle, atteignant 400 km/h et plus, soit le double de son intensité « normale ». Par un effet indirect de la rotation de la Terre sur elle-même (la force d'inertie de Coriolis), ce vent fort d'altitude est associé à un contraste thermique horizontal entre les zones au sud du courant et celles au nord. Ce contraste, qui représente une énergie potentielle convertible en vent est l'élément nécessaire mais non suffisant pour expliquer les tempêtes. L'augmentation du vent dans une dépression dépend de la synchronisation, au sein de la trajectoire, d'un tourbillon précurseur vers 9 km d'altitude et d'un autre, décalé vers l'est, près du sol.

Deuxième facteur : seules des dépressions de petites tailles se sont formées sur l'Atlantique. Pour cette raison, sans doute, elles sont restées guidées par le courant-jet, jusqu'à son extrémité, donc sur la France.

Troisième facteur, conséquence des deux premiers : la région la plus favorable à l'amplification de telles tempêtes est l'extrémité du jet. Fin décembre 1999, c'est notre pays qui, chose très rare, se trouve sous cet endroit favorable. Le mécanisme en jeu, lié à la circulation verticale de l'air, est peu sensible à la présence d'une terre ferme (contrairement à un cyclone tropical), ce qui a laissé la possibilité au phénomène de s'amplifier sur terre.

Quatrième facteur : la situation en altitude s'accompagne, dans les basses couches de l'atmosphère, d'une sorte d'écho : une vaste circulation cyclonique à l'échelle de l'est du bassin Atlantique. Située à l'aplomb du courant-jet, elle passe aussi sur notre pays. À elle seule, cette circulation donne des vents de 70 km/h sur la France. Quand la

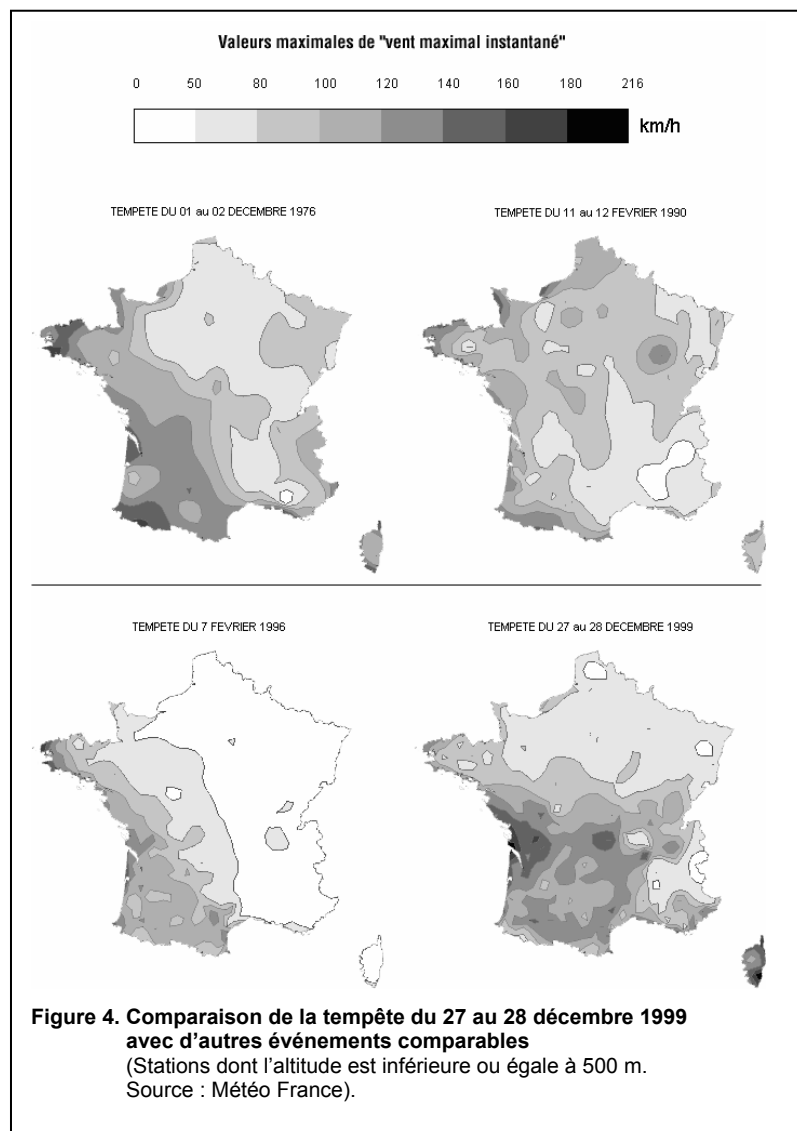


dépression se superpose à cette circulation, sans avoir à atteindre une intensité propre exceptionnelle (intensité obtenue en l'isolant par la pensée du reste de la circulation, avec des vents « propres » eux aussi de l'ordre de 70 km/h), l'addition des deux, dans le secteur sud des dépressions donne aussitôt des vents destructeurs, de l'ordre de 140 km/h (en moyenne sur une vaste zone). Dans le secteur nord, les vents s'annulent.

Cinquième facteur : toujours en raison de sa petite taille et de son intensité propre assez habituelle, la première tempête est loin d'avoir consommé toute l'énergie disponible le long du jet. Au rythme habituel, une seconde dépression a pu prendre naissance : en soi, cet enchaînement est normal. Cette seconde tempête a modifié profondément le courant-jet et mis ainsi fin à l'épisode.

Des tempêtes encore présentes dans les mémoires

Les 15 et 16 octobre 1987, une tempête avait affecté la Bretagne, la Normandie et le Nord ainsi que le sud de la Grande-Bretagne avec des rafales maximales mesurées dépassant les 180 km/h. En 1990, une série de plusieurs tempêtes exceptionnelles par leur répétition et, dans une moindre mesure, par leur intensité avait affecté la France de fin janvier à début février. D'autres tempêtes ont atteint la France dans le passé, par exemple les 10-12 janvier 1978, 6 juillet 1969, 12 mars 1967, 7 août 1948, 4-6 décembre 1896. Les figures 3 et 4 permettent de comparer l'étendue des zones touchées par les vents forts pour quelques-unes de ces tempêtes historiques. On peut affirmer que les deux événements récents que la France vient de subir sont exceptionnels par leur intensité, par le territoire concerné par des rafales supérieures à 120 km/h et par la gravité et l'ampleur des conséquences.



Aspects statistiques de l'occurrence de vitesses de vent extrêmes

Les données de vitesse de vent archivées par Météo France ne sont pas d'une qualité optimale. En effet, le capteur anémométrique Papillon utilisé depuis l'après-guerre jusqu'aux années 1970 sur beaucoup de sites (remplacé ensuite par des capteurs fréquencesométriques qui ne posent pas de problème) est connu pour surestimer les vents forts, typiquement de l'ordre de 10%. D'ailleurs la majorité des records de vitesse de vent date des années 1950-1960. Par ailleurs, on n'a pas conservé de traces d'un changement d'étalonnage, opéré en 1963, et la lecture précise des vents forts sur l'enregistreur était délicate du fait de la réponse non linéaire de l'appareil. Enfin, il semble que les observateurs de l'époque aient souvent été tentés d'utiliser l'enregistreur au-delà de sa gamme nominale de 0-50 m/s. Tout cela a conduit la Division climatologie du service central d'exploitation météorologique à ne calculer des normales de vent pour la période trentenaire de référence 1961-1990 que sur une période réduite, 1981-1990.

Les figures 5 et 6 (ci-après) montrent comment se situent les points maximaux de vent par rapport à celles qui sont observées lors de cette période : dans les deux cas, un bon tiers des zones touchées a été soumis à des vents records pour la période considérée (zones foncées).

Les données de valeurs extrêmes de vitesse de vent archivées dans la Banque de données climatologiques (BDCLim) de Météo France sont de deux ordres :

- vitesse moyenne maximale journalière et sa direction associée ;

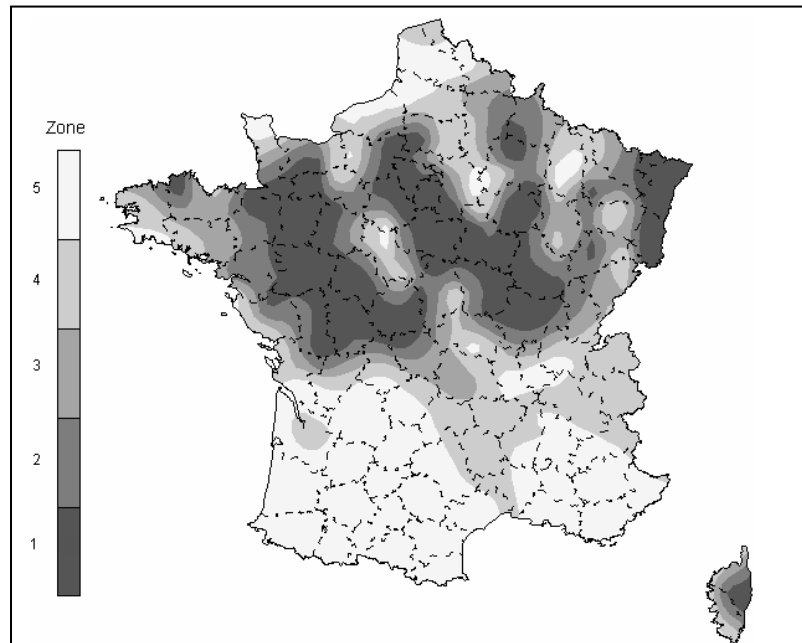


Figure 5. Tempête du 25 au 26 décembre 1999
rangs des vitesses de vent maximal instantané depuis 1981

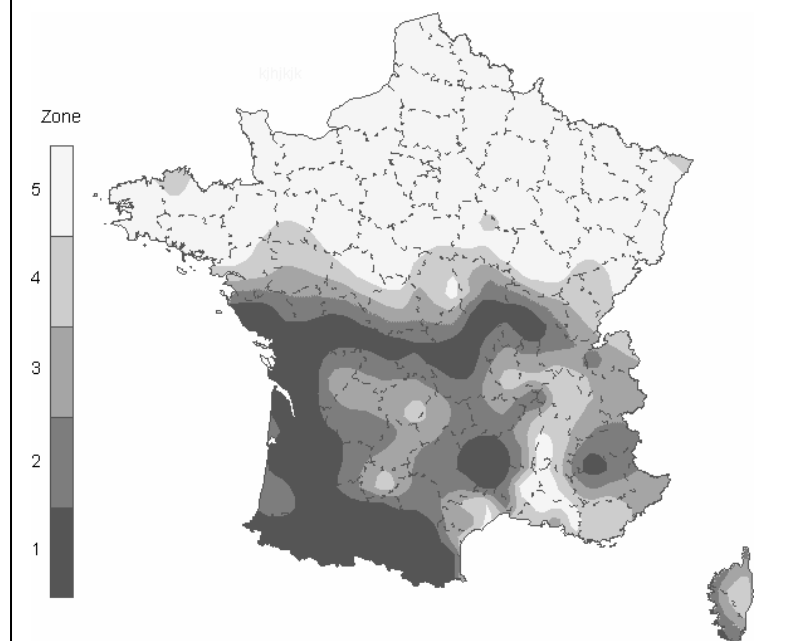


Figure 6. Tempête du 27 au 28 décembre 1999
rangs des vitesses de vent maximal instantané depuis 1981

- rafale intégrée sur 0,5 s maximale journalière et sa direction associée.

À partir de ces données de base incluant l'année 1991 et les précédentes jusqu'à l'immédiate après-guerre, le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB, EN-CLI 93.9) a calculé des durées de retour, en corrigeant les données antérieures à 1970 pour prendre en compte la surestimation des anémomètres Papillon. On rappelle qu'un échantillon de 45 ans permet d'estimer des durées de retour fiables au plus de 180 ans.

Le tableau ci-dessous fournit pour 76 stations les quantiles de durées de retour 50, 100, 150 ans (en km/h) de la vitesse moyenne du vent de référence (ramenée à une rugosité standard de 5 cm), ainsi que les valeurs (brutes, non ramenées à une rugosité de référence) maximales observées sur les deux épisodes des vents moyens et rafales instantanées, et les directions de vent associées.

À noter que le facteur moyen liant vent moyen et rafales intégrées sur 0,5 s pour un site rural est de l'ordre de 1,63. Les stations pour lesquelles les valeurs centennales sont dépassées sont indiquées en gras.

On note en gros trois zones de vents centennaux ou plus :

- un périmètre Strasbourg, Colmar, Mulhouse, Orléans, Rouen, Reims, Nancy, Strasbourg, dont la majorité des valeurs dépassent parfois largement les valeurs cent-cinquantennales ;
- le pied des Pyrénées ;
- la côte atlantique depuis Biscarosse jusqu'à la Vendée.

	Dp ^t	Q ₅₀ (km/h)	Q ₁₀₀ (km/h)	Q ₁₅₀ (km/h)	FFmoy obs (km/h)	Ddmoy obs (°)	FFmax obs (km/h)	Ddmax obs (°)
Amberieu	01	93	98	101	65	210	101	210
Saint-Quentin	02	95	100	102	72	250	119	320
Saint-Auban	04	90	94	96	72	330	122	350
Embrun	05	88	92	94	40	210	76	230
Cannes	06	88	93	96	65	270	115	280
Nice	06	87	92	94	68	270	115	270
Saint-Girons	09	88	92	94	86	310	137	300
Carcassonne	11	91	96	99	86	290	140	310
Istres	13	114	120	123	72	280	104	280
Marignane	13	86	89	91	76	300	101	300
Salon	13	106	111	114	43	240	76	260
Caen	14	97	101	104	94	320	151	320
Deauville	14	95	99	102	61	350	104	350
Chassiron	17	95	100	103	83	220	198	230
Avord	18	88	93	95	86	230	122	230
Bourges	18	95	100	102	72	260	122	290
Ajaccio	20	93	98	101	79	280	122	290
Bastia	20	110	116	119	94	280	155	320
Solenzara	20	133	139	143	83	270	173	290
Dijon	21	80	83	85	83	260	126	260
Rostrenen	22	104	108	111	68	250	130	260
Evreux	27	88	91	93	101	300	140	240
Chateaudun	28	93	98	101	112	270	144	270
Brest	29	102	106	108	72	280	122	250
Landivisiau	29	105	110	113	90	270	133	260
Quimper	29	129	137	141	83	240	122	230
Nîmes	30	84	87	88	50	300	94	270
Toulouse Fran	31	98	103	106	79	280	137	290
Bordeaux	33	95	100	102	90	280	144	260
Cazaux	33	87	91	93	86	270	140	250
Montpellier	34	81	85	87	69	290	115	290
Dinard	35	95	100	103	101	270	158	280
Rennes	35	93	98	101	76	270	126	270
Tours	37	89	94	96	86	260	130	270
Biscarosse	40	99	102	104	122	270	166	270
Dax	40	90	95	97	40	280	72	280
Mont-de-Marsan	40	91	95	97	79	270	130	270
Saint-Etienne	42	87	91	93	25	190	83	190
Nantes	44	101	107	111	76	260	126	240
Saint-Nazaire	44	101	106	109	86	260	133	260
Orléans	45	96	101	104	112	260	151	250
Gourdon	46	93	98	101	61	270	126	290
Reims	51	95	100	102	104	300	151	300
Langres	52	93	97	100	76	270	140	280
Saint-Dizier	52	86	90	92	101	290	158	200
Nancy	54	93	98	101	101	250	155	250
Lorient	56	100	105	108	86	240	130	250
Metz	57	95	101	104	76	230	133	270
Phalsbourg	57	107	112	115	94	250	155	250
Nevers	58	94	99	102	68	260	115	260
Lille	59	96	100	103	25	280	36	270
Beauvais	60	92	95	98	97	330	137	310
Creil	60	88	93	95	72	310	115	260
Biarritz	64	96	101	104	65	280	122	270
Pau	64	88	93	95	94	290	140	290
Tarbes	65	91	96	99	79	300	137	300
Perpignan	66	108	113	115	86	300	140	320
Strasbourg	67	85	89	91	101	250	144	260
Bâle-Mulhouse	68	89	93	95	79	270	130	260
Colmar	68	84	88	90	101	220	155	200
Lyon-Bron	69	89	93	95	65	190	104	160
Luxeuil	70	85	89	91	86	240	126	250
Saint-Yan	71	87	92	94	76	240	119	220
Le Mans	72	98	104	107	65	270	126	260
Bourg-Saint-Maurice	73	87	90	92	32	240	76	210
Chambéry	73	120	127	131	72	270	133	160
Rouen	76	92	96	98	90	340	140	330
Melun	77	89	93	95	112	240	166	240
Abbeville	80	97	102	105	68	270	101	260
Hyères	83	96	100	102	72	280	112	290
Saint Raphaël	83	98	103	106	65	290	112	280
Carpentras	84	95	98	101	32	340	76	320
Orange	84	96	99	101	40	240	68	260
Poitiers	86	87	90	92	83	250	140	250
Limoges	87	89	94	97	76	260	148	250
Le Bourget	95	93	98	101	90	230	148	230

La situation hydrologique

Un élément déterminant pour les dégâts aux forêts semble avoir été l'état hydrique des sols. A titre d'exemple, dans les Landes, Mont-de-Marsan a connu un cumul de précipitations important en 1999 (1 100 mm) et de pluies fortes la veille des deux événements (respectivement 45 et 25 mm). Les sols détrempés ont favorisé l'arrachage des arbres. La figure 7 montre le résultat du modèle de bilan hydrique à deux réservoirs de Météo France au 1^{er} janvier 2000, la carte étant établie pour une réserve utile (RU) de 150 mm. On note que sur la majorité du pays, en particulier les zones touchées par les vents forts, les sols superficiels étaient proches de la saturation. La figure 8 montre le cumul de précipitations pour décembre 1999 et la figure 9, l'écart à la normale qui est conséquent dans bien des endroits et supérieur à la normale sur la quasi-totalité du pays hors Sud-Est.

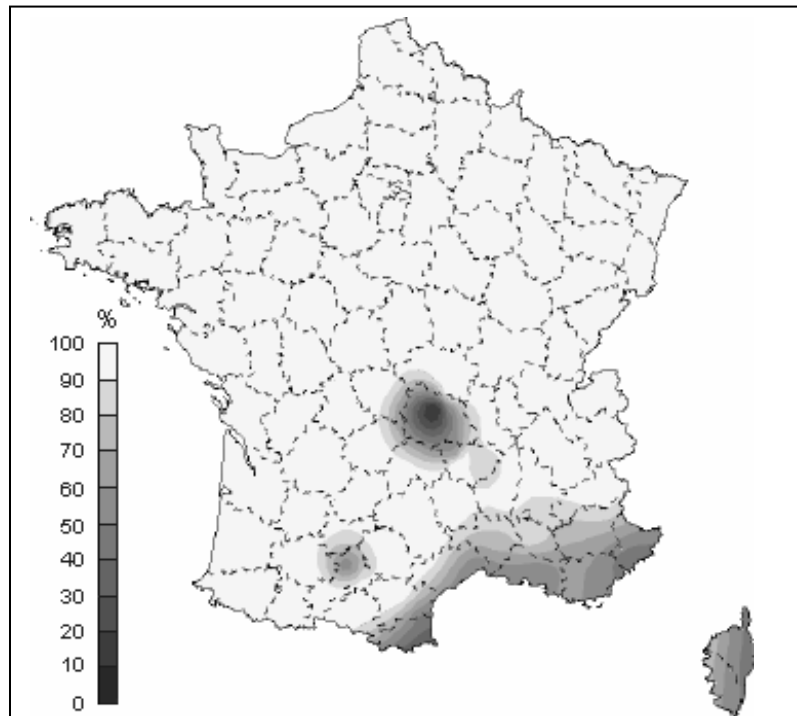


Figure 7. État des réserves en eau du sol pour une réserve utile $R = 150$ mm au 1^{er} janvier 2000

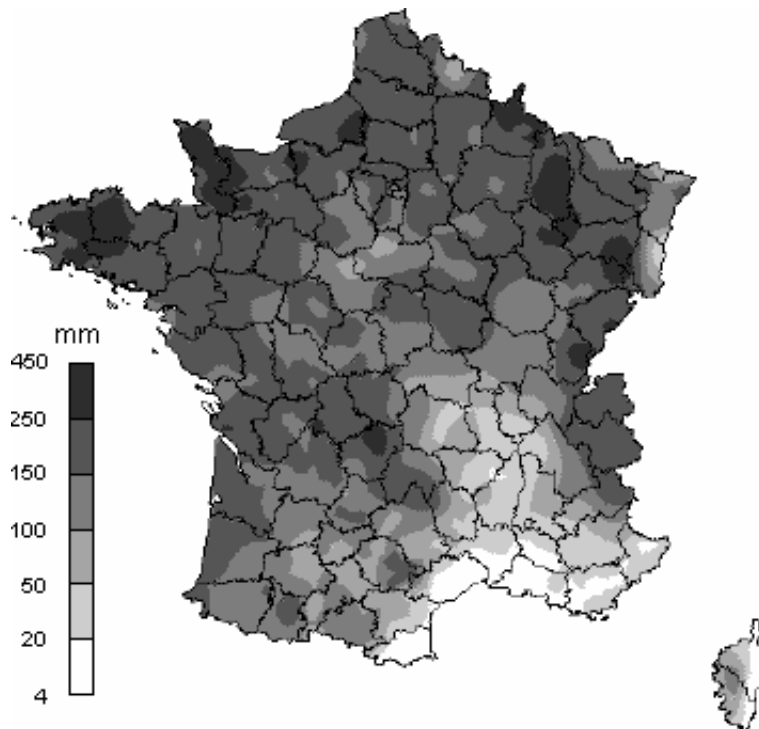


Figure 8. Hauteurs de précipitations relevées en décembre 1999

Les tempêtes sont-elles attribuables au changement climatique ?

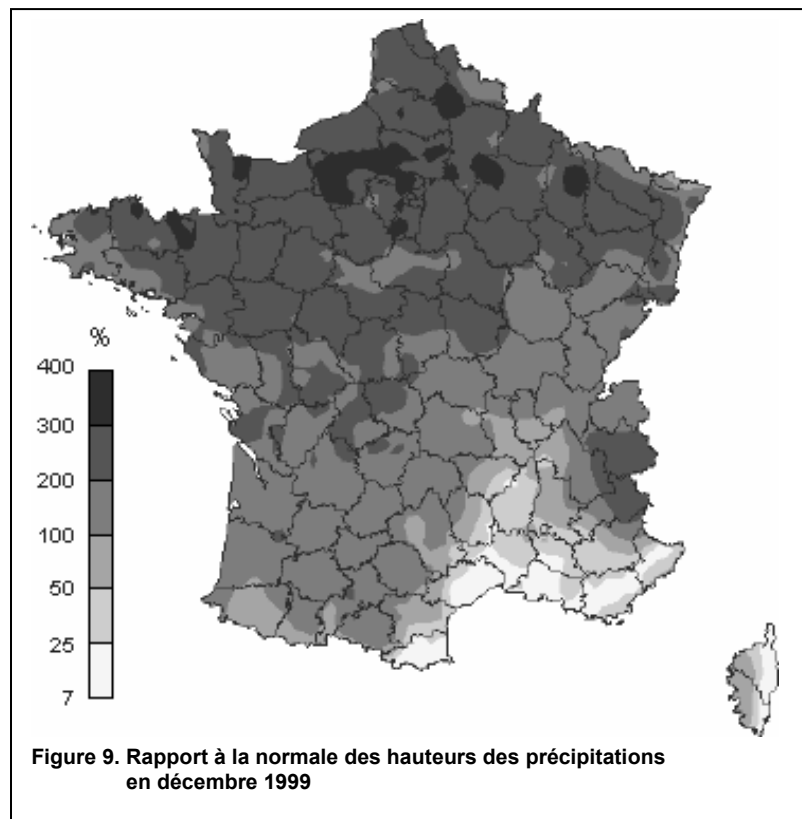
Le lien entre réchauffement global (de l'ordre de $0,6^{\circ}\text{C}$ sur le XX^{e} siècle) et effet de serre dû à l'augmentation de la teneur en gaz comme CO_2 , CH_4 ... est largement admis, et visible : records de chaleur régulièrement battus, retrait des glaces de mer et des glaciers, élévation du niveau de la mer, nécessité de faire appel aux effets anthropiques pour reproduire le climat actuel avec les modèles climatiques...

Les modèles climatiques prédisent que, dans l'hypothèse d'un doublement du CO_2 au milieu du XX^{e} siècle, le climat se réchauffera de 1 à 4°C selon les modèles, ces valeurs étant largement modulées par la latitude : le réchauffement sera plus sensible aux pôles. De ce fait, le contraste thermique pôles/équateur - le moteur de la circulation générale de l'atmosphère avec la rotation terrestre - devrait diminuer.

Les modèles prédisent en outre :

- une intensification du cycle hydrologique (zones humides plus humides, zones sèches plus sèches) ;
- une élévation du niveau de l'océan de quelques dizaines de cm ;
- une oscillation australe plus marquée (Niño/Niña).

Apprécier l'évolution de la variabilité de l'occurrence des tempêtes requiert l'analyse de séries de données les plus longues et les plus homogènes possibles. Les défauts d'homogénéité résultent en particulier des modifications au cours du temps des techniques de mesures, du déplacement des stations d'observation ou encore de la densification progressive du réseau d'observation. Bien que les archives des cartes météorologiques couvrent une période d'une centaine d'années aux latitudes extratropicales de l'hémisphère nord, leur qualité n'est pas considérée comme suffisante pour une évaluation correcte du nombre et de l'intensité des tempêtes sur l'ensemble de cette période. Des reconstitutions de trajectoires de dépressions sont toutefois disponibles à partir de 1874, sur l'Atlantique nord-est, mais ces données ne s'accompagnent pas systématiquement de mesures de pression permettant de classer les phénomènes en fonction de leur intensité. Pour réaliser cette classification ou celle des tempêtes, on ne peut malheureusement pas toujours se fier aux mesures de vent trop rares et trop imprécises à la surface des océans. Un meilleur indicateur est généralement la pression atmosphérique de surface pour laquelle on dispose de séries souvent plus longues et plus homogènes.



Des chercheurs suédois ont ainsi reconstitué des séries locales de vent géostrophique¹ sur une centaine d'années au nord-ouest de l'Europe à partir de la mesure des pressions au niveau de la mer de triplets de stations météorologiques éloignées de quelques centaines de kilomètres. À nos latitudes, le vent géostrophique, déduit des gradients horizontaux de pression, est très fortement corrélé au vent réel mesuré près de la surface. L'analyse des résultats montre une augmentation des valeurs extrêmes de vent géostrophique à partir du milieu des années 1960. Cependant, cette augmentation fait suite à une diminution quasi régulière depuis le début de la période de mesure à laquelle se superpose une variabilité décennale de faible amplitude. À la fin du XIX^e siècle, les valeurs extrêmes de vent géostrophique étaient d'intensités comparables à celles de la période la plus récente. Ces observations, bien que ne concernant que des régions côtières et ne permettant qu'une évaluation indirecte de la force des vents réels, semblent donc indiquer une variabilité interdécennale de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes les plus fortes. L'essentiel de cette variabilité est probablement d'origine naturelle et l'importance des fluctuations rend très difficile la détection d'une éventuelle tendance sur le siècle attribuable aux activités humaines.

La variabilité multidécennale des tempêtes et les limitations des séries de données existantes ne permettent donc pas à ce jour de conclure à une tendance significative sur le siècle de leur fréquence ou intensité ni *a fortiori* de l'attribuer à la modification de la composition chimique de l'atmosphère liée aux activités humaines.

La seconde question posée est celle de savoir s'il faut s'attendre, dans le futur, à une modification anthropogénique de cette variabilité. Pour y répondre, il est nécessaire de faire appel à la modélisation numérique du climat qui permet de simuler différents scénarios tels que celui d'un doublement de la concentration du gaz carbonique ou celui, plus élaboré, d'une augmentation progressive de la concentration de l'ensemble des gaz à effet de serre et d'une variation de la concentration des particules en suspension dans l'atmosphère (aérosols). Le premier type de scénario, moins exigeant en ressources de calcul, permet d'utiliser des modèles de plus forte résolution, c'est-à-dire représentant des phénomènes d'échelle plus réduite. Ce point est particulièrement crucial dès lors qu'il s'agit de reproduire des événements dont la taille caractéristique est de l'ordre de 500 km comme dans le cas des tempêtes de décembre. Les meilleures résolutions utilisées dans les études de ce type ont été de l'ordre d'une centaine de kilomètres, mais n'ont permis de simuler que quelques années dans les conditions du climat actuel et dans celles d'un climat modifié par un doublement de la concentration du gaz carbonique atmosphérique. Les résolutions des modèles climatiques utilisés ont plus souvent été de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Il reste possible avec ces modèles de comptabiliser l'occurrence des dépressions et de les classer en fonction de leur intensité, les plus creuses étant associées aux tempêtes. Cela peut être suffisant pour déterminer si la distribution de l'intensité et le nombre de dépressions change lorsque le climat est perturbé par les gaz à effet de serre ou par les aérosols. Mais ces résolutions ne sont pas suffisantes pour reproduire des tempêtes de faible taille pouvant figurer parmi les plus intenses.

Une autre méthode consiste à déterminer des critères de plus grande échelle qui sont statistiquement reliés aux phénomènes extrêmes et à étudier l'évolution simulée de ces critères qui sont eux identifiables dans les modèles de basse résolution. Dans le cas des tempêtes des moyennes latitudes, on utilise généralement la variabilité de la pression atmosphérique en altitude en se limitant à des périodes de quelques jours représentatives de la durée de vie des dépressions. La région où cette variabilité est la plus forte correspond à la zone dite du rail des dépressions, localisée autour de 50°N, dont on peut ainsi apprécier l'éventuelle déformation.

¹ Vent géostrophique : vent déduit par le calcul d'un équilibre entre la force de pression, dépendante du gradient horizontal de pression atmosphérique, et la force de Coriolis, induite par la rotation de la terre.

De l'ensemble des études effectuées ces dernières années, il se dégage quelques mécanismes pouvant influencer sur une évolution future de la fréquence ou de l'intensité des tempêtes, mais aussi une grande diversité de résultats des simulations numériques.

Le changement climatique simulé par les modèles numériques se traduit généralement par une réduction du gradient nord-sud de température des basses couches atmosphériques. L'instabilité atmosphérique, en particulier au-dessus de l'Atlantique nord, étant fortement conditionnée par l'intensité du gradient de température sur toute l'épaisseur de l'atmosphère, cette réduction est un facteur d'atténuation de la variabilité atmosphérique associée aux dépressions. Cependant, les modèles simulent aussi généralement une intensification de la convection dans les régions tropicales qui a pour effet d'y transporter plus de chaleur en altitude et donc d'augmenter au contraire le gradient nord-sud de température, mais cette fois en altitude. Ce réchauffement tropical agit donc en sens inverse du mécanisme précédent. L'importance relative de ces deux principaux mécanismes dans les différentes simulations peut être à l'origine de résultats parfois contradictoires. La méthode du comptage des dépressions et celle de l'analyse du rail des dépressions conduisent aussi, pour les mêmes simulations, à des résultats sensiblement différents.

Plusieurs études, réalisées à partir de simulations numériques, concluent que le changement climatique devrait s'accompagner d'un déplacement vers le nord, et parfois vers l'est, du rail des dépressions de l'Atlantique nord, ainsi qu'une intensification de la variabilité. Ces changements de la variabilité atmosphérique s'accompagneraient d'une augmentation du gradient nord-sud de pression correspondant à une plus grande fréquence des phases positives de l'oscillation nord Atlantique, un mode de variabilité atmosphérique bien connu des climatologues. Cependant, le lien entre ces résultats et la fréquence ou l'intensité des tempêtes, en particulier en Europe, est loin d'être clairement établi. À partir de ces mêmes simulations, plusieurs équipes de recherche européennes et une équipe canadienne arrivent à des conclusions sensiblement différentes : pour une des études, il y aurait un déplacement vers le nord des trajectoires des tempêtes mais pas de modification de leur intensité ; pour une autre, il y aurait une décroissance de la fréquence et de l'intensité des tempêtes sur l'ensemble de l'Atlantique nord mais une légère augmentation en Mer du Nord et dans le Golfe de Gascogne ; pour deux autres études, il pourrait y avoir une réduction du nombre total de dépressions mais une augmentation du nombre des tempêtes, la localisation des trajectoires des dépressions n'étant pas significativement modifiée. Ces résultats, en partie contradictoires et parfois non significatifs au sens statistique, s'expliquent par une compétition de mécanismes agissant très probablement dans la nature mais que les modèles reproduisent diversement. L'étude des phénomènes extrêmes se situe aussi aux limites des capacités de calcul actuelles, conduisant à l'utilisation des modèles de basse résolution dans les simulations les plus longues et impliquant des hypothèses statistiques dont la stabilité n'est pas assurée dans les conditions d'un climat modifié. Enfin, même dans le cas des modèles de plus forte résolution, la reproduction des phénomènes extrêmes dépend fortement de la représentation de processus non résolus directement mais qui interagissent avec les plus grandes échelles, tels que les ondes de relief ou la convection orageuse. Ces remarques plaident en faveur de la confrontation des résultats d'ensemble de simulations réalisées par différents modèles sur des périodes couvrant plusieurs décennies, une tendance qui se dessine au sein de la communauté scientifique internationale.

En résumé, on ne dispose pas actuellement d'éléments permettant d'assurer que les événements catastrophiques récents sont la marque du changement climatique, mais lorsqu'il sera plus accentué, il n'est pas invraisemblable d'affirmer qu'on puisse observer une augmentation des événements extrêmes v