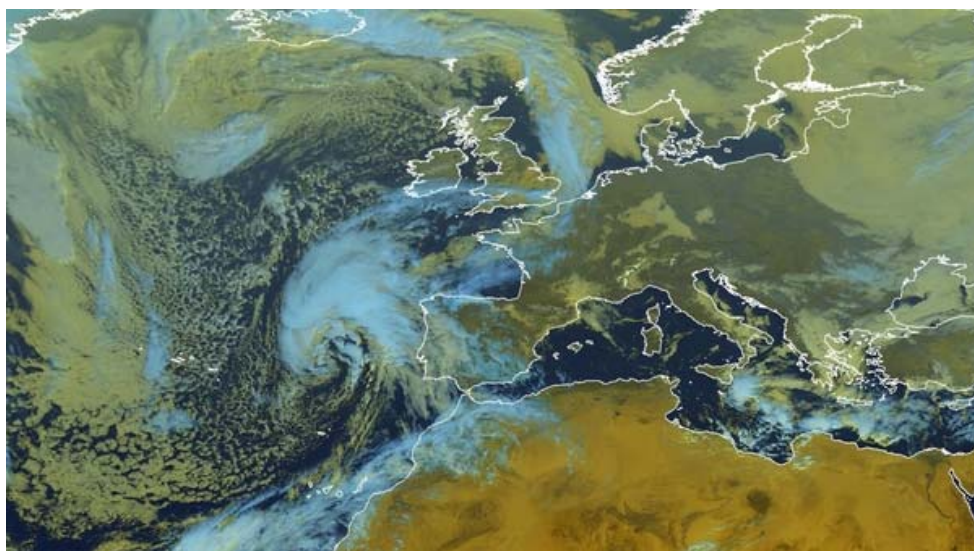


Direction
Interrégionale
Ouest

BP 49139
35091 RENNES Cedex 9

Etude des tempêtes menaçant le littoral breton

VIMERS 0



**Pré-voir les tempêtes à venir
Pour mieux s'y préparer**

***Etude réalisée
dans le cadre du projet
VIMERS 0***

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

1. GENERALITES PRELIMINAIRES	1
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE	1
1.2. ENJEUX THEORIQUES ET PRATIQUES DE L'ETUDE	2
2. HISTORIQUE DES TEMPETES AYANT TOUCHE LE LITTORAL BRETON	3
2.1. DONNEES MOBILISEES : UNE GRANDE HETEROGENEITE	3
2.2. IDENTIFICATION DES DATES DE VIMERS SIGNIFICATIVES	4
2.2.1. <i>Tempêtes anciennes</i>	5
2.2.2. <i>Sélection de dates à partir de la BDCLIM</i>	8
2.2.2.1. Données utilisées	8
2.2.2.1.1. Paramètres météorologiques	8
2.2.2.1.2. Stations météorologiques	9
2.2.2.2. Critères testés	11
2.2.3. Récapitulatif des critères retenus	14
2.2.4. Quelques statistiques sur les dates_critères	15
2.3. CARACTERISATION DES VIMERS IDENTIFIEES	17
2.3.1. <i>Elaboration d'une base de données tempêtes</i>	18
2.3.2. <i>Fiches descriptives des vimers identifiées</i>	22
3. TYPOLOGIE DES TEMPETES	23
3.1. TRANSFORMATION DU TABLEAU EVENEMENTS TEMPETUEUX	24
3.1.1. <i>Homogénéisation du pas de temps</i>	24
3.1.2. <i>Définition de nouvelles variables</i>	26
3.1.3. <i>Quelques statistiques à partir des nouvelles variables</i>	28
3.1.3.1. Les déplacements moyens	29
3.1.3.2. Les distances à la région	30
3.1.3.3. Les pressions	31
3.1.3.4. Les vents en Beaufort sur les deux côtes Nord et Sud	32
3.2. METHODE GENERALE DE CLASSIFICATION	33
3.2. DIFFERENTES CLASSIFICATIONS TESTEES	35
3.3. DESCRIPTION DE LA CLASSIFICATION RETENUE	37
3.3.1. <i>Phases de mise au point</i>	37
3.3.2. <i>Analyse des résultats</i>	39
3.3.2.1. Analyse mathématique	39
3.3.2.2. Description des classes	41
3.3.2.3. Classement de certains événements	54
3.4. CONCLUSION DE LA TYPOLOGIE	57

1. GENERALITES PRELIMINAIRES

1.1. Contexte de l'étude

Afin d'améliorer la connaissance des phénomènes générateurs des aléas littoraux et donc, la pertinence de la vigilance Vagues-Submersion, Météo-France a engagé une étude des phénomènes tempétueux menaçant le littoral breton, dans un projet dénommé VIMERS en référence à l'appellation donnée aux submersions marines générées par la concomitance de tempêtes et de fortes marées dans le folklore rétais. La zone d'étude comporte tout le littoral breton, ainsi que les littoraux des départements limitrophes assurant la fermeture d'un périmètre homogène d'étude : Ouest et Nord Cotentin dans le département de la Manche, Loire-Atlantique et Vendée.

Cette étude a pour but d'établir :

- un premier historique documenté des tempêtes connues pour avoir touché le littoral breton
- un premier jeu de tempêtes auxquelles le littoral breton a échappé de peu ainsi que
- une première typologie de ces vimers permettant d'apprécier si l'histoire nous a dévoilé ses "*pires*" tempêtes dans chaque famille typologique

La DREAL Bretagne a engagé en 2012, avec le renfort du BRGM, l'élaboration d'un **atlas des risques littoraux** menaçant la région Bretagne (à l'exception du département du Morbihan, déjà traité par ailleurs). La définition des aléas littoraux repose sur l'exploitation des différents facteurs physiques représentatifs des états de mer : hauteurs de marée (avec prise en compte d'une élévation du niveau de la mer dans la perspective du changement climatique), hauteurs de houle, surcotes provoquées par les dépressions, etc. Ce travail gagnerait à bénéficier des résultats de l'étude VIMERS-0, aussi la DREAL Bretagne a-t-elle consenti à Météo-France une subvention par convention du 26/10/2012.

La Région Bretagne est également intéressée par les résultats de cette étude et a consenti, par convention du 15/01/2013, au financement de cette étude.

Le présent rapport expose les résultats obtenus dans le projet VIMERS-0.

1.2. Enjeux théoriques et pratiques de l'étude

Depuis les dramatiques événements consécutifs au passage de la tempête Xynthia (27-28 février 2010), de nombreuses études ont été menées, ou sont en cours, portant sur les sujets des submersions marines provoquées ou aggravées par les tempêtes atlantiques. Toutes mobilisent la mémoire du risque à travers l'historique des tempêtes et submersions marines passées.

Quoique l'histoire constitue un formidable levier d'action pour la prévention des risques naturels en général et littoraux en particulier, elle ne donne à connaître qu'une fraction seulement de ces risques. Contrairement au risque d'inondations, pour lequel les risques "inconnus" relèvent essentiellement de crues plus fortes (et donc, plus rares) que celles déjà connues dans l'histoire, les risques littoraux peuvent être masqués en partie derrière des circonstances favorables qui ont conduit certaines tempêtes puissantes à n'occasionner que peu de dommages (et donc, à n'être point mémorisées comme dangereuses) simplement parce que leur trajectoire favorable a épargné les lieux vulnérables, ou encore, parce que leur concomitance avec une basse mer ou une marée faible en a limité les conséquences en terme de submersion ou de recul du trait de côte.

Une connaissance précise et exhaustive des événements tempétueux historiques, absolument nécessaire, ne semble donc pas suffisante pour éclairer les décideurs locaux et les populations dans leurs choix d'adaptation aux risques actuels. Il n'est pas illégitime de se demander ce qu'une tempête majeure n'ayant fait qu'effleurer le territoire, aurait pu donner à quelques kilomètres près, ou à quelques heures – ou minutes – près... Le projet propose de compléter les données d'archives historiques avec les caractéristiques des phénomènes météo-marins résultant des tempêtes fictives plausibles, générateurs des submersions marines, qui auraient pu frapper le littoral moyennant une modification raisonnable des circonstances. Cette technique a déjà été employée dans le contexte des territoires ultramarins pour simuler des cyclones fictifs, et rien ne s'oppose en théorie à ce qu'elle soit mise en œuvre dans le contexte métropolitain.

2. HISTORIQUE DES TEMPÊTES AYANT TOUCHÉ LE LITTORAL BRETON

2.1. Données mobilisées : une grande hétérogénéité

Le CETMEF a procédé à un recensement de dates de tempêtes d'après les archives historiques, du VIII^{ème} siècle à nos jours, comme autant de dates autour desquelles a été focalisée la recherche documentaire.

Les bases de données de Météo-France (BDCLIM) contiennent un historique très complet de mesures de vent (direction et force) et de pression atmosphérique sur une douzaine de points de mesure en Bretagne (le plus souvent des sémaphores et aéroports principaux). Les caractéristiques des appareils de mesure de chaque époque sont en principe disponibles et permettent de prendre en compte d'éventuelles ruptures d'homogénéité dans ces mesures.

Ces données sont le plus souvent archivées numériquement au pas de temps tri-horaire entre 1946 et 1992, au pas de temps horaire après cette date (soit sur 1993/2012). Pour un événement un jour donné, il a parfois été possible de récupérer des mesures horaires entre 1946 et 1992, à l'aide des carnets d'observations pour compléter l'analyse des phénomènes.

Entre 1940 et 1945, il existe très peu de données météorologiques archivées numériquement. En faisant des recherches spécifiques, on peut trouver des informations intéressantes. De 1880 environ à 1939, on dispose de quelques données numériques parcellaires et d'un certain nombre d'archives qui peuvent permettre de reconstituer des événements avec une certaine finesse.

Enfin, sur différents sites internet (NOAA, DWD...), on peut trouver des cartes isobariques reconstituées sur l'ensemble du XX^{ème} siècle. Celles-ci ont été réalisées à grande échelle spatiale et temporelle (1 à 2 cartes par jour). Leur disponibilité immédiate peut paraître alléchante mais est parfois trompeuse (une petite dépression très mobile bien réelle peut par exemple ne pas figurer sur ces cartes isobariques) et il est difficile d'extrapoler ce qui se passe entre deux cartes à 12 heures d'intervalle.

Des ré-analyses beaucoup plus fines (dites ERA-INTERIM du ECMWF) sont disponibles depuis 1979 à résolution temporelle de 6 heures et spatiale de 50 km. Cette résolution est encore insuffisante pour décrire les phénomènes qui nous intéressent ici. Par contre, ces réanalyses de bonne qualité peuvent servir de base de départ au lancement de modèles à maille fine comme le modèle Arpège ou Arome de Météo-France. On obtient alors des champs de forçages de vent et de pression à haute résolution, pour chaque épisode considéré, sur la période 1979/2012.

Toutefois, dans le cas des réanalyses de la NOAA comme des réanalyses du ECMWF, il ne s'agit que de simulations qui, pour fascinantes qu'elles soient, doivent toujours être confrontées aux données disponibles avant d'être considérées comme représentatives, et notamment, aux données d'archives non-numérisées (qui n'ont donc pas été exploitées au moment des réanalyses). Il ne faut surtout pas s'interdire de rejeter une simulation si la dépression générée est incohérente avec les observations disponibles ce jour-là.

Les informations compilées sont donc très hétérogènes, non exhaustives avec un volume très variable selon les événements. Elles ont été triées et expertisées par Météo-France, puis complétées par deux sources très complémentaires : (i) les données d'archives non-numérisées d'une part, (ii) les simulations numériques de réanalyses d'autre part.

(i) Météo-France est engagé, depuis les années 1990, dans un vaste travail de numérisation des archives de météorologie, appelé "*Data Rescue*". Le volume de données déjà traité est conséquent, mais il reste de nombreux documents à numériser. Dans le cadre du projet VIMERS-0, les efforts de numérisation "*Data Rescue*" de la Direction Interrégionale Ouest ont été focalisés, en 2012, sur les données barométriques disponibles dans les archives des centres météorologiques de Vendée, Morbihan, Finistère, Côtes d'Armor, Ille-et-Vilaine et Manche, aux dates de tempêtes recensées.

(ii) Depuis 1980, plusieurs tempêtes significatives ont frappé le littoral breton. Pour ces événements, les réanalyses ERA-INTERIM sont disponibles (modèle global européen au pas de 50 km). Il est ainsi possible de compléter finement les jeux d'observations, actuellement limités au réseau météorologique au sol, avec les champs de paramètres physiques issus de ces simulations à haute résolution spatiotemporelle. Ces simulations ont dû être validées par un expert de météo-France pour vérifier la trajectoire et l'intensité des phénomènes en comparant observations et simulations.

2.2. Identification des dates de vimers significatives

L'un des objectifs de l'étude est de produire une typologie pertinente des tempêtes menaçant le littoral breton (les "vimers" par la suite). Afin de respecter les critères usuels de population statistique minimale assurant une certaine pertinence à la typologie, il a été nécessaire d'identifier au moins une centaine de dates de vimers à documenter de manière détaillée.

Météo-France tient à jour, depuis 2001, une base de données des événements marquants (BDEM) dans laquelle sont identifiées et documentées certaines anomalies météorologiques. Parmi celles-ci, environ cinquante tempêtes ayant touché la Bretagne depuis la fin du XIX^{ème} siècle sont déjà recensées. La majorité de ces événements est incluse dans la période récente 1985/2011.

En complément, Météo-France a effectué un travail de sélection automatique des événements passés en utilisant les mesures de vent et de pression disponibles depuis 1950 dans la base de données climatologiques (BDCLIM par la suite) pour une vingtaine de stations bretonnes.

2.2.1. Tempêtes anciennes

Dans ce paragraphe, on désigne par tempête ancienne des événements qui se sont produits **avant 1950** (période du début des mesures de vent et pression utilisables en Bretagne). Une sélection d'événements a été réalisée grâce aux éléments contenus dans la BDEM (base de données d'événements marquants interne à Météo-France). Elle a permis de retenir une dizaine de tempêtes ayant eu de forts impacts dont la liste figure dans le tableau ci-après. Il s'agit là d'une première liste d'événements à traiter en priorité.

sélection de tempêtes anciennes prioritaires
4 décembre 1896
3 février 1904
8 janvier 1924
8 octobre 1924
18 au 20 septembre 1930
27 janvier 1937
13 et 14 mars 1937
16 novembre 1940
11 et 12 janvier 1943

Tableau 2.1 : sélection de tempêtes anciennes prioritaires

Pendant cette période, il existe peu ou pas d'information météorologique dans les bases de données. Nous avons récupéré auprès de la Direction de la Climatologie à Toulouse des Bulletins Climatologiques Quotidiens (BQE). Ces documents très précieux ont été réalisés à l'époque par le service météorologique français. Ils contiennent de nombreuses informations permettant de caractériser les tempêtes sélectionnées, que nous avons complétées par des données de barogrammes existant pour certaines dates sélectionnées.

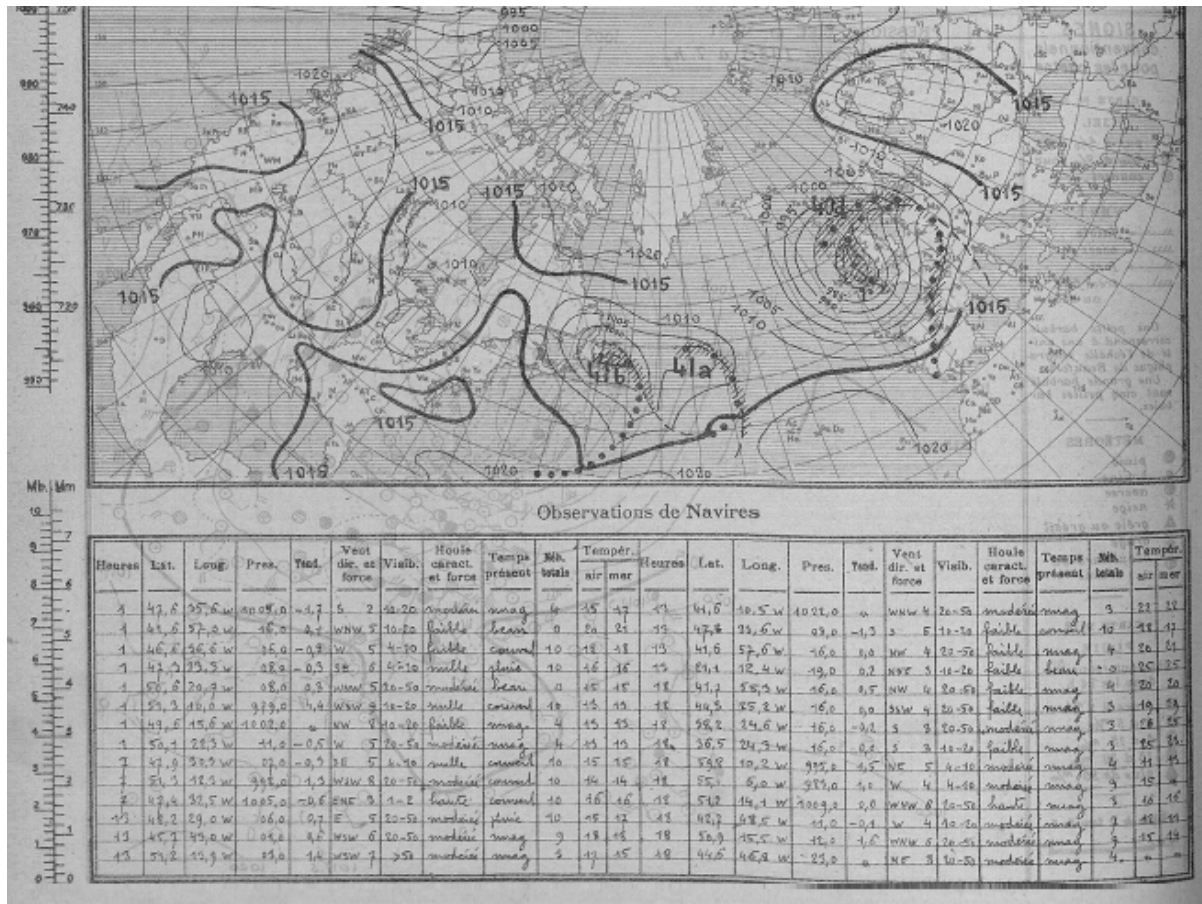


Figure 2.1 : exemple de contenu partiel d'un BQE de 1930 avec carte isobarique en haut et observations de navires en bas.

Par le truchement d'une expertise météorologique, ces informations peuvent conforter, amender ou disqualifier des réanalyses et des situations synoptiques établies par ailleurs. Cette tâche a été réalisée dans les centres météorologiques de Brest, Cherbourg et Nantes. Le principe est que chacun s'approprie une date et essaie de tirer le maximum d'informations pour la caractériser au mieux. L'objectif final est bien de pouvoir comparer ces événements anciens à fort impact aux événements plus récents dont le processus de traitement est détaillé dans les paragraphes suivants. A terme, Météo-France aimerait pouvoir établir les meilleures situations récentes analogues aux tempêtes passées. Cela sera possible pour certaines de ces tempêtes anciennes mais pas pour d'autres.

A titre d'exemple, la tempête des 13 et 14 mars 1937 donne lieu à des difficultés d'interprétation qui montrent la complexité d'une situation tempétueuse (pour plus d'informations, on se reportera à l'annexe consacrée à cette tempête). L'expertise météorologique adossée aux documents d'archives met en évidence l'existence de trois centres dépressionnaires ayant chacun sa trajectoire propre.

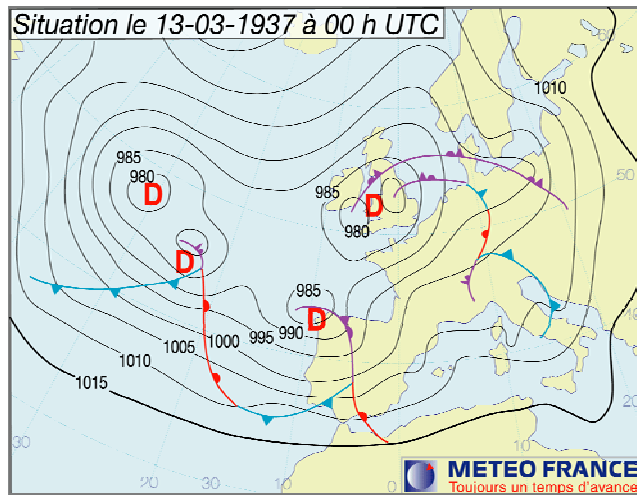


Figure 2.2 : situation isobarique du 13 mars 1937 expertisée par des météorologistes

Cette expertise météorologique donne une vision très différente de celle qui résulterait d'une exploitation directe, et un peu naïve, des réanalyses disponibles pour cette date.

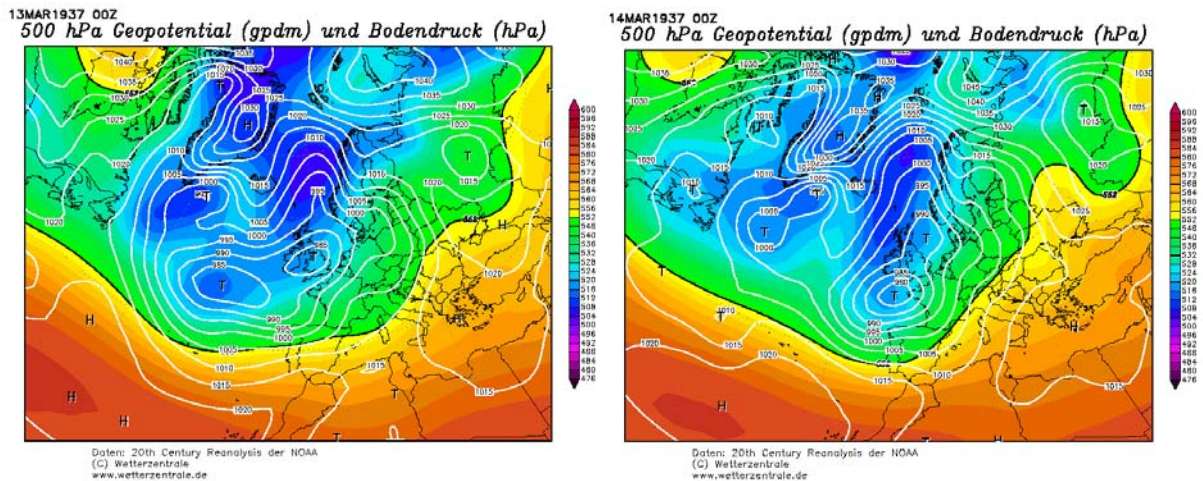


Figure 2.3 : réanalyses XX^{ème} siècle de la NOAA du géopotential 500 hPa pour les 13 et 14 mars 1937

Pour chaque tempête analysée, l'expertise débouche sur une proposition de pointage du centre dépressionnaire toutes les trois heures, ce qui permet de reconstituer une trajectoire. Par exemple, la figure suivante présente la trajectoire établie pour la tempête des 7 et 8 octobre 1924.

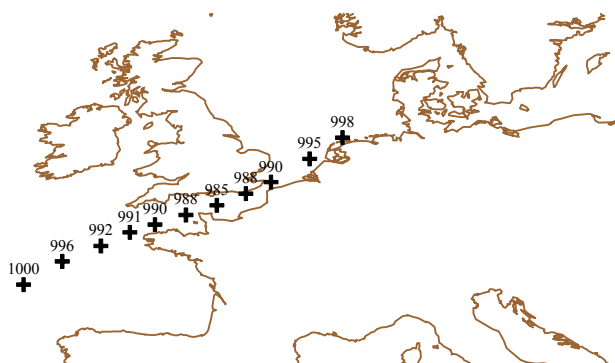


Figure 2.4 : trajectoire reconstituée de la tempête des 7 et 8 octobre 1924

2.2.2. Sélection de dates à partir de la BDCLIM

2.2.2.1. Données utilisées

2.2.2.1.1. Paramètres météorologiques

Les paramètres météorologiques sont mesurés en suivant des règles normalisées, strictes, communes au monde entier ; cela permet d'assurer une cohérence entre toutes les mesures et donc de procéder à des comparaisons.

- Le vent

Le vent est mesuré par des capteurs situés à 10 mètres du sol dans un espace bien dégagé. Les directions d'où vient le vent s'expriment en degrés sur une rose de 360 degrés : 90° correspond à un vent soufflant d'est, 180° à un vent soufflant de sud, 270° à un vent soufflant d'ouest et 360° à un vent soufflant de nord. La direction "0°" est réservée aux vents calmes (moins de 0,5 m.s⁻¹).

Les vitesses (ou forces ou modules) du vent sont exprimées en mètres par seconde, parfois en nœuds (1 nœud ≈ 0,5 m.s⁻¹) ou en kilomètres par heure (1 m.s⁻¹ = 3,6 km.h⁻¹). Elles peuvent être considérées en termes de rafale (maximum instantané mesuré) ou de moyenne sur 10 minutes. Afin de focaliser clairement cette étude sur les événements tempétueux structurés à méso-échelle, et d'éviter l'intégration d'événements de coups de vent très ponctuels, seul le vent moyen horaire (moyenne sur 10 minutes) a été utilisé ici.

Ces mesures de vents sont archivées dans la BDCLIM au pas de temps tri-horaire avant le milieu des années 1990, puis au pas de temps horaire.

Remarque : en météorologie, les heures sont données en Temps Universel Coordonné (heures UTC). Les relations entre l'heure locale en France et l'heure UTC sont les suivantes :

en hiver, heure locale = heure UTC + 1 ; en été, heure locale = heure UTC +2.

- La pression atmosphérique

Les abris météorologiques où sont situés les appareils de mesure de la pression sont ventilés et sont implantés au-dessus d'un sol gazonné dans un espace largement dégagé.

La pression atmosphérique est équivalente au poids d'une colonne d'air s'étendant au-dessus d'une surface d'air unité jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère. Elle s'exprime en hectopascals (hPa) et est mesurée par un baromètre.

Selon les besoins, la pression atmosphérique peut être la pression à la station ou une pression réduite au niveau de la mer. Dans le premier cas, il s'agit de la pression déduite de la lecture du baromètre à la station après corrections et, si nécessaire, réduction de sa valeur à l'altitude de la station ; dans le second cas, il s'agit de la pression au niveau moyen de la mer calculée d'après la pression mesurée à la station.

C'est la pression réduite au niveau de la mer qui est utilisée ici, car elle permet une comparaison directe avec d'autres mesures de pression distantes pour établir des gradients de pression et des lignes isobariques.

La **tendance barométrique**, qui quantifie la variation de la pression atmosphérique pendant les trois heures précédant l'observation, est apparue comme un paramètre également intéressant à tester.

2.2.2.1.2. Stations météorologiques

Les stations situées dans les sémaphores sont les premières touchées lors des tempêtes et les plus caractéristiques des conditions météorologiques rencontrées sur les côtes lors de tels épisodes. Les observations des sémaphores bretons et, pour élargir le domaine, celles des sémaphores de l'Ouest Cotentin, au nord, et de ceux situés de l'embouchure de la Loire à l'île d'Oléron, au sud, sont donc examinées (carte suivante).

Sémaphores retenus

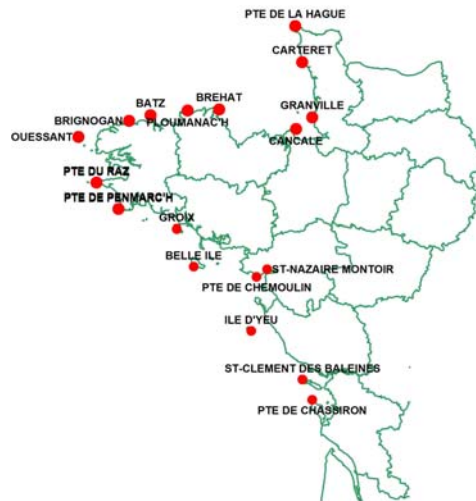


Figure 2.5 : cartographie des sémaphores retenus

Les observations sont tri-horaires avant les années 1994/1996, horaires depuis.

Les séries de vent des sémaphores débutent généralement avant 1950 (la série de Ploumanac'h est la plus récente : début des mesures en avril 1997) ; elles sont toujours actualisées (sauf celle de Cancale : fin des mesures en décembre 1998).

département	nom	début des mesures de vent	fin des mesures de vent
22	île de BREHAT	1-janv.-49	en cours
22	PLOUMANAC'H	29-avr.-97	en cours
29	BRIGNOGAN	1-sept.-84	en cours
29	île de BATZ	1-janv.-49	en cours
29	île d'OUESSANT	1-janv.-49	en cours
29	pointe de PENMARC'H	1-janv.-49	en cours
29	pointe du RAZ	1-juin-51	en cours
35	CANCALE	1-janv.-49	31-déc.-98
50	pointe de LA HAGUE	1-janv.-49	en cours
50	GRANVILLE	1-janv.-49	en cours
50	CARTERET	1-nov.-86	en cours
44	ST-NAZAIRE MONTOIR	1-juil.-57	en cours
44	pointe de CHEMOULIN	10-juil.-95	en cours
56	BELLE ILE	1-janv.-49	en cours
56	île de GROIX	1-janv.-49	en cours
85	île d'YEU	1-janv.-48	en cours
17	ST-CLEMENT des BALEINES	1-janv.-89	en cours
17	pointe de CHASSIRON	1-janv.-49	en cours

Tableau 2.2 : sémaphores retenus, dates de début et de fin des mesures de vent

Les mesures de la pression débutent généralement avant 1950 (sauf à Saint-Nazaire Montoir et à Brignogan). Pour le tiers des sémaphores, les mesures ont cessé dans la fin des années 1990 ou dans les années 2000.

département	nom	début des mesures de pression	fin des mesures de pression
22	île de BREHAT	1-janv.-21	2-mai-97
22	PLOUMANAC'H	1-sept.-50	17-juil.-12
29	île d'OUESSANT	1-janv.-21	17-juil.-12
29	BRIGNOGAN	1-oct.-84	17-juil.-12
29	île de BATZ	1-janv.-17	30-avr.-99
29	pointe de PENMARC'H	1-janv.-21	17-juil.-12
29	pointe du RAZ	1-janv.-21	17-juil.-12
35	CANCALE	8-mai-44	31-déc.-98
50	pointe de LA HAGUE	1-janv.-21	17-juil.-12
50	GRANVILLE	1-sept.-45	19-août-96
44	ST-NAZAIRE MONTOIR	1-juil.-57	17-juil.-12
56	BELLE ILE	1-avr.-30	17-juil.-12
56	île de GROIX	1-janv.-21	2-oct.-08
85	île d'YEU	1-janv.-49	17-juil.-12
17	pointe de CHASSIRON	1-janv.-21	17-juil.-12

Tableau 2.3 : sémaphores de la façade atlantique retenus pour leurs mesures de pression, dates de début et de fin des mesures de pression

2.2.2.2. Critères testés

Une procédure automatique est mise en place pour identifier des dates pour lesquelles un événement tempétueux significatif a laissé son empreinte dans les enregistrements des instruments de mesure. L'objectif n'est pas d'obtenir une liste exhaustive de tous les phénomènes susceptibles de provoquer des dégâts sur le littoral depuis 1950, mais d'identifier un échantillon représentatif de ces phénomènes en nombre raisonnable pour permettre d'expertiser les trajectoires et les intensités.

En effet, les situations météorologiques de toutes les dates ainsi sélectionnées après 1979 sont systématiquement décrites dans le détail dans le paragraphe 2.3, avec rédaction d'une fiche de synthèse individuelle (1979 est l'année à partir de laquelle les réanalyses ERA-INTERIM du ECMWF sont disponibles). L'effectif cible doit être voisin de 150 dates ultérieures à 1979. Des seuils de sensibilité sur le vent ou sur la pression sont donc recherchés par itérations successives pour atteindre cet objectif.

Dans un premier temps, pour caractériser les épisodes de tempêtes en Bretagne, la côte Nord, de la pointe de Penmarc'h à la pointe de La Hague, et la côte Sud, de la pointe du Raz à la pointe de Chassiron sont traitées séparément. Un chevauchement est assuré entre les deux côtes.

Selon la côte, les critères de sélection sont différents.

- Pour la côte Nord, critère "vent côte Nord" :
 - ✓ vents moyens d'ouest (270 °) à Nord-Est (70 °)
 - ✓ modules du vent supérieurs ou égaux à 18, à 20, à 22 et à 24 m/s
 - ✓ plus de la moitié des stations mesurant le vent à l'heure de l'observation est concernée. Le nombre de stations disponibles varie entre 7 et 11 sur la période 1950 / 2012.

Avec un seuil à 18 m/s, 496 dates répondant aux trois conditions peuvent être sélectionnées. Avec un seuil à 24 m/s, il n'en reste plus que 26.

Le seuil de 22 m/s est conservé : cela représente 103 dates, certaines pouvant être consécutives, et correspondre alors soit à un seul événement tempête soit à plusieurs événements tempêtes consécutifs rapprochés.

- Pour la côte Sud, critère "vent côte Sud" :
 - ✓ vents moyens de Sud-Est (110 °) à Ouest (270 °)
 - ✓ modules du vent supérieurs ou égaux à 18, à 20, à 22, à 24 et à 25 m/s
 - ✓ plus de la moitié des stations mesurant le vent à l'heure de l'observation est concernée. Le nombre de stations disponibles varie entre 5 et 9 sur la période 1950 / 2012.

Avec le seuil de 18 m/s, 398 dates peuvent être sélectionnées ; avec le seuil de 25 m/s, il n'en reste que 20.

Le seuil de 22 m/s est conservé : soit 74 dates, certaines pouvant être consécutives.

Afin de sélectionner des phénomènes "type Xynthia", extrêmes mais affectant le Sud de la zone (donc moins de 50 % des sémaphores de la côte Sud impactés par des vents forts), un second critère, relatif à la pression, est également testé sur cette côte.

- Pour la côte sud, critère "pression côte Sud"
 - ✓ pression en-dessous de 990 hPa
 - ✓ observation d'une hausse de plus de 5 hPa en 3 heures
 - ✓ 50 % au moins des stations disponibles à l'heure de l'observation doivent être concernés. Le nombre de stations disponibles est de 6 ou 7 sur la période 1950 / 2012.

448 dates répondent à la première condition, 162 à la deuxième et 62 aux deux à la fois, certaines pouvant être consécutives.

A ce stade de la recherche, 190 dates sont identifiées sur la période 1950/2012.

En parallèle, Météo-France a consulté les experts du CETMEF et du SHOM, qui disposent de bases de données (Candhis, Anemoc, Refmar) ou de monographies des tempêtes historiques (F. Bouttes), afin d'identifier des dates de tempêtes qui auraient échappé à la sélection automatique précédente, par exemple parce que la tempête est restée au large sans toucher la totalité de la côte Sud et/ou celle de la côte Nord.

Dans un deuxième temps, il est donc apparu important de tester également des critères de sélection ne portant que sur les sémaphores de la pointe de la Bretagne, de l'île de Batz à l'île de Groix.

- Pour la pointe de la Bretagne, critère "vent pointe Bretagne"
 - ✓ vents moyens quelle qu'en soit la direction
 - ✓ modules du vent supérieurs ou égaux à 20, à 22, à 24 et à 26 m/s
 - ✓ plus de la moitié des stations mesurant le vent à l'heure de l'observation est concernée. Le nombre de stations disponibles varie entre 4 et 7 sur la période 1950 / 2012

Avec le seuil de 20 m/s, 506 dates peuvent être sélectionnées ; avec le seuil de 26 m/s, il n'en reste que 26.

Le seuil de 22 m/s est conservé : soit 210 dates, certaines pouvant être consécutives.

Enfin, dans un troisième temps, il est décidé par souci d'homogénéité de traitement entre la côte Sud et la côte nord d'appliquer également le critère relatif à la pression entre Penmarc'h et La Hague. En effet, cela n'a pas été fait d'emblée sur la côte Nord car il a été considéré que la majorité des dates répondant à de telles exigences correspondrait à des dates déjà sélectionnées par un des quatre autres critères précédemment exposés, en particulier les critères "vent côte Sud" et "pression côte Sud". Néanmoins, cela demande vérification.

- Pour la côte nord, critère "pression côte Nord"
 - ✓ pression en-dessous de 990 hPa
 - ✓ observation d'une hausse de plus de 5 hPa en 3 heures
 - ✓ 50 % au moins des stations disponibles à l'heure de l'observation doivent être concernés. Le nombre de stations disponibles varie entre 6 et 10 sur la période 1950 / 2012.

625 dates répondent à la première condition sur la pression, 190 à la deuxième condition sur la tendance et 84 aux deux à la fois, certaines pouvant être consécutives.

Parmi ces 84 dates, seules 21 n'ont pas déjà été sélectionnées précédemment.

Une rapide étude météorologique de ces nouvelles dates, après 1979 (soit 11), montre qu'elles n'apportent aucun élément complémentaire vraiment significatif aux dates déjà sélectionnées. Ces dernières constituent déjà à elles seules, nous semble-t-il, un échantillonnage représentatif des phénomènes susceptibles d'occasionner des dégâts majeurs sur la côte. Il est rappelé ici que le but de la sélection n'est pas d'obtenir la liste exhaustive de l'ensemble des tempêtes ayant frappé la région depuis 1950 ; c'est pourquoi, la suite de l'étude ne s'intéresse qu'aux dates sélectionnées par au moins l'un des quatre critères "vent côte Nord", "vent côte Sud", "vent pointe Bretagne", "pression côte Sud".

Pour mémoire, les dates répondant au seul critère "pression côte Nord" sont répertoriées dans le tableau suivant, avec la pression minimale observée et la tendance maximale.

critère "pression côte Nord"		
date aaaammjj	pression minimale	tendance maximale
19500206	984.3	7.2
19541209	963.9	6.8
19550114	985.8	6.9
19550201	976.7	6.3
19600225	987.1	7.5
19660222	970.6	6.3
19690422	980.7	6.5
19701119	974.5	7.3
19710121	966.1	7.5
19720212	980.9	7.6
19810322	979.5	7.8
19821014	975.9	6.3
19910308	970.8	5.7
19980416	979.3	8.9
19991025	985.9	6.2
20010322	987.2	7.8
20041020	986.8	8.7
20080111	987.4	7.2
20100224	979.2	6.3
20101031	985.3	5.5
20101219	979.7	11.6

Au final, 297 dates répondant à au moins l'un des quatre critères météorologiques "vent côte Nord", "vent côte Sud", "vent pointe Bretagne", "pression côte Sud" sont sélectionnées sur la période janvier 1950/juin 2012. Dans la suite de l'étude, ces dates seront appelées dates_critères. Elles peuvent être consécutives ; elles appartiennent alors soit au même événement tempétueux, soit à des événements différents mais consécutifs et très rapprochés dans le temps.

2.2.2.3. Récapitulatif des critères retenus

Les critères retenus ici sont purement météorologiques ; ainsi, une date est réputée significative d'une tempête ayant touché la zone d'étude si :

- Côte Nord
vents d'Ouest à Nord-Est de plus de 22 m/s sur plus de 50 % des stations
- Côte Sud
vents de Sud-Est à Ouest de plus de 22 m/s sur plus de 50 % des stations
OU
pression mer inférieure ou égale à 990 hPa avec une hausse supérieure ou égale à 5 hPa en 3 heures sur au moins 50 % des stations
- Pointe Bretagne
vents de toutes les directions de plus de 22 m/s sur plus de 50 % des stations

Les dates_critères ne sont pas sélectionnées pour les dégâts qui ont pu être constatés à la côte ou par les conséquences hydrodynamiques à la côte, mais parce qu'elles correspondent toutes à des niveaux de vent ou de pression déterminés. Ainsi, parmi les 49 dates d'évènements tempétueux jugés significatifs par le SHOM du fait de leurs caractérisation hydrodynamique (i.e. au moins deux ports ont été affectés par des surcotes de PM ou de BM importantes), seules 22 apparaissent dans notre sélection purement météorologique.

Notre crible météorologique nous amène à sélectionner 297 dates_critères, consécutives ou non, entre janvier 1950 et juin 2012 ;

- 171 dates le sont du fait d'un seul des quatre critères (22 avec le critère "vent côte Nord", 18 avec le critère "vent côte Sud", 45 avec le critère "pression côte Sud" et 86 avec le critère "vent pointe Bretagne" ;
- 103 dates du fait de deux des quatre critères (le critère "vent pointe Bretagne" est généralement l'un des deux, sauf pour le 11/02/1974 et le 16/12/2011 où les deux critères relatifs à la côte Sud sont impliqués) ;
- 20 dates du fait de trois des quatre critères (le critère "vent pointe Ouest" est toujours l'un des trois ; les deux autres peuvent être indifféremment "vent côte Sud" et "pression côte Sud" (5), "vent côte Nord" et "pression côte Sud" (6), "vent côte Sud" et "vent côte Nord" (9)) ;
- 3 dates (16/01/1955, 29/11/1965 et 12/02/1970), du fait des quatre critères.

Le graphique suivant résume ces informations.

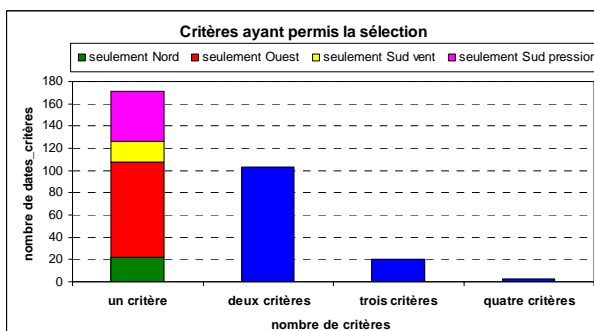


Figure 2.6 : effectif des dates_critères en fonction du nombre de critères remplis

Un tableau récapitulatif des 297 dates mentionnant quel(s) critère(s) météorologique(s) a (ont) permis la sélection est joint dans un fichier excel à part. Les dates_critères sont classées en deux groupes "avant 1979" et "après 1979", 1979 étant l'année à partir de laquelle les réanalyses ERA INTERIM du ECMWF sont disponibles et à partir de laquelle **tous** les événements tempétueux (142) auxquels les dates_critères appartiennent sont systématiquement décrits dans le détail dans le paragraphe 2.3. Avant 1979, seuls les **quelques** événements tempétueux (5 en fait) déjà bien documentés (informations donc immédiatement disponibles) font également l'objet d'une expertise ; ils correspondent à 7 dates_critères.

Ce sont ces 147 événements tempétueux expertisés qui serviront pour réaliser une typologie des tempêtes sur la Bretagne dans la partie 3.

2.2.2.4. Quelques statistiques sur les dates_critères

Le graphique suivant montre l'évolution du nombre de dates_critères sélectionnées par an entre 1950 et 2011 (l'année 2012 n'est pas complète).

Le changement du pas de temps des observations dans les années 1990 ne semble pas avoir d'impact visible sur le nombre de dates sélectionnées par an.

En 1968, aucune date n'est sélectionnée ; en 1950 et 1951, 14 dates sont sélectionnées (principalement des dates concernant le vent sur la pointe de la Bretagne en 1950 et des dates concernant le vent sur la pointe de la Bretagne et/ou le vent sur la côte Sud).

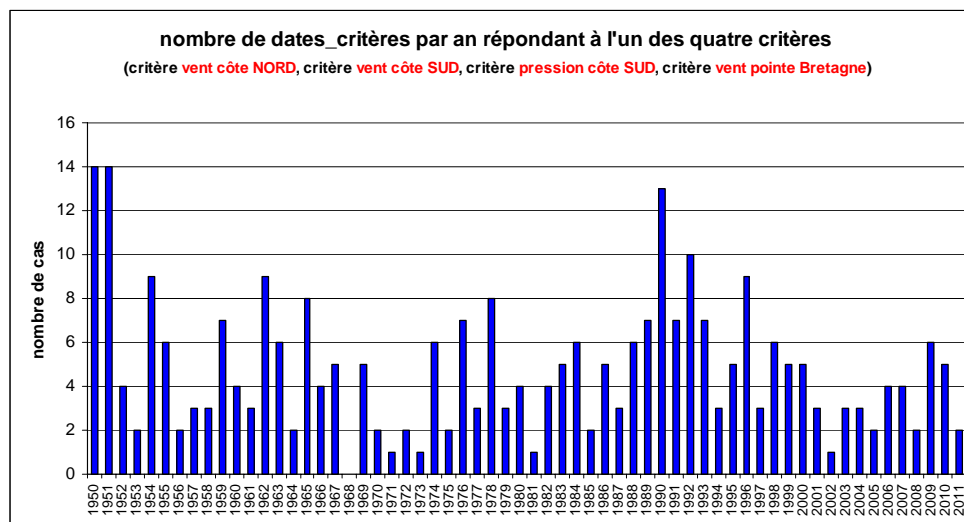


Figure 2.7 : évolution du nombre de dates_critères par an entre 1950 et 2011

Comme cela apparaît sur le graphique ci-dessous, le nombre de dates sélectionnées diffère selon le mois (période 1950/2011).

Les épisodes de tempêtes s'observent principalement de novembre à février et quasiment pas entre avril et septembre.

Les quelques cas retenus entre avril et septembre le sont du fait des critères relatifs aux vents sur la côte Nord et/ou sur la côte Sud et/ou sur la pointe Bretagne. En effet, durant ces mois, entre 1950 et 2011, la pression ne descend que rarement au-dessous de 990 hPa (jamais en juin, juillet et août) ; il a quand même été relevé 966,9 hPa le 12/09/1993. Les hausses de pression de plus de 5 hPa en 3 heures sont également peu fréquentes (au plus 13,9 hPa en 3 heures le 16/06/1965).

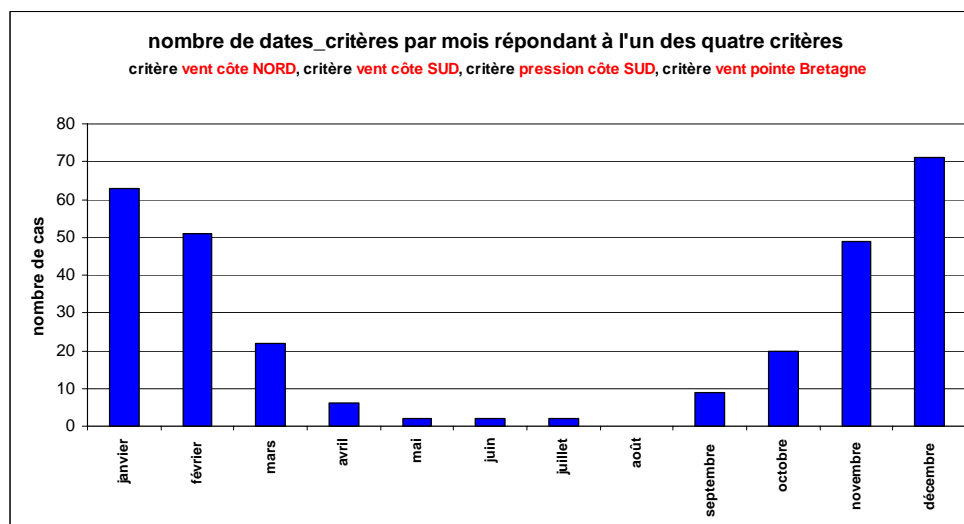


Figure 2.8 : nombre de dates_critères par mois (période 1950/2011)

Remarque : des cas de tempêtes répondant aux critères peuvent être observés au moment des marées d'équinoxe : le 21/09/1953 (critère vent côte Sud) ou le 24/09/1974 (critère vent côte Nord) et le 18/03/1950 ou le 22/03/1976 ou les 23 et 24/03/1992 ou le 19/03/2007 (critère vent côte pointe Bretagne parfois associé au critère vent côte Nord).

2.3. Caractérisation des vimers identifiées

La caractérisation des vimers s'inscrit dans une difficulté inhérente aux tempêtes en général : la météorologie ne propose pas une définition générale des tempêtes, mais les assimile à des perturbations atmosphériques qui comprennent des variations de pression atmosphérique et de vent suffisantes pour présenter des risques de dommages pouvant aller de quelques dégâts matériels à des ravages catastrophiques.

Deux domaines apportent cependant un cadre plus précis pour cette notion. Le premier est celui de la météorologie des régions tropicales et subtropicales, qui définit dans ces régions les systèmes dépressionnaires de grandes échelles appelés "tempêtes tropicales". Le second est celui de la météorologie marine, qui détermine le régime de tempête par l'intermédiaire du vent, repéré dans l'échelle Beaufort par des vitesses moyennes allant de la limite inférieure de la force 10, soit 48 nœuds ou 89 km/h, à la limite supérieure de la force 11 (violente tempête), soit 63 nœuds ou 117 km/h ; à partir de 64 nœuds ou 118 km/h, le vent acquiert la force 12 et la tempête prend le nom d'ouragan.

Dans le cadre de cette étude le seuil de vent testé et retenu de 22 m/s correspond à la force 9 de l'échelle de Beaufort.

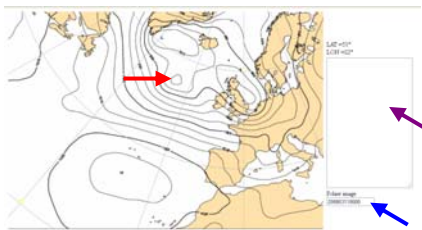
Le tableau suivant rappelle le descriptif de l'échelle de Beaufort.

L'échelle de Beaufort					
Nombre de Beaufort	Terme générique	Vitesse du vent à 10 m de hauteur			Que se passe-t-il au large ?
		en m/sec	en km/h	en noeuds	(remarques)
0	Calme	moins de 1	moins de 1	moins de 1	La fumée s'élève verticalement La mer est comme un miroir
1	Très légère brise	1 à 1,59	1 à 5	1 à 3	Il se forme des rides, mais il n'y a pas d'écume
2	Légère brise	1,60 à 2,99	6 à 11	4 à 6	Vaguelettes courtes Leurs crêtes ne déferlent pas
3	Petite brise	3,00 à 5,19	12 à 19	7 à 10	Très petites vagues Ecume d'aspect vitreux
4	Jolie brise	5,20 à 7,69	20 à 28	11 à 15	Petites vagues devenant plus longues Moutons nombreux
5	Bonne brise	7,70 à 10,49	29 à 38	16 à 21	Vagues modérées, allongées Moutons nombreux
6	Vent frais	10,5 à 13,59	39 à 49	22 à 26	Des lames se forment Crêtes d'écume blanche plus étendues
7	Grand frais	13,60 à 16,99	50 à 61	27 à 33	La mer grossit, l'écume est soufflée en trainées Lames déferlantes
8	Coup de vent	17,00 à 20,49	62 à 74	34 à 40	Lames de hauteur moyenne De leurs crêtes se détachent des tourbillons
9	Fort coup de vent	20,50 à 24,09	75 à 87	41 à 47	Grosses lames Leur crête s'écroule et déferle en rouleaux
10	Tempête	24,10 à 28,39	88 à 102	48 à 55	Très grosses lames à longues crêtes en panache Déferlement en rouleaux intense et brutal
11	Violente tempête	28,40 à 32,49	103 à 117	56 à 63	Lames exceptionnellement hautes Mer recouverte de bancs d'écume blanche
12	Ouragan	plus de 32,50	plus de 118	plus de 64	Air plein d'écume et d'embruns Mer entièrement blanche ; visibilité très réduite

Tableau 2.4 : descriptif de l'échelle de Beaufort

2.3.1. Elaboration d'une base de données tempêtes

Pour chacun des 147 événements tempétueux retenus (qui correspondent à 162 dates_critères) nous avons commencé par caractériser simplement chaque événement identifié comme significatif, en rassemblant les données disponibles et en fabriquant des données supplémentaires relatives à la trajectoire (grâce à la mise au point, pour les besoins de cette étude, d'un outil de pointage graphique de trajectoire avec une précision de l'ordre du degré de latitude et de longitude) ou à la lame d'eau précipitante exprimant la trace géographique de l'événement (graphiques suivants).



Après avoir enregistré les cartes ERA-INTERIM, il suffit d'écrire la date choisie dans le cadre (flèche bleue). Le clic de la souris au centre du minimum (flèche rouge) provoque l'affichage des coordonnées latitude et longitude dans le cadre (flèche magenta)

Figure 2.9 : outil de pointage graphique de trajectoire développé pour cette étude (événement du 11 mars 2008)

La figure suivante donne un aperçu de l'ensemble des 147 trajectoires ainsi obtenues.

Trajectoires de tous les événements tempêtes étudiés

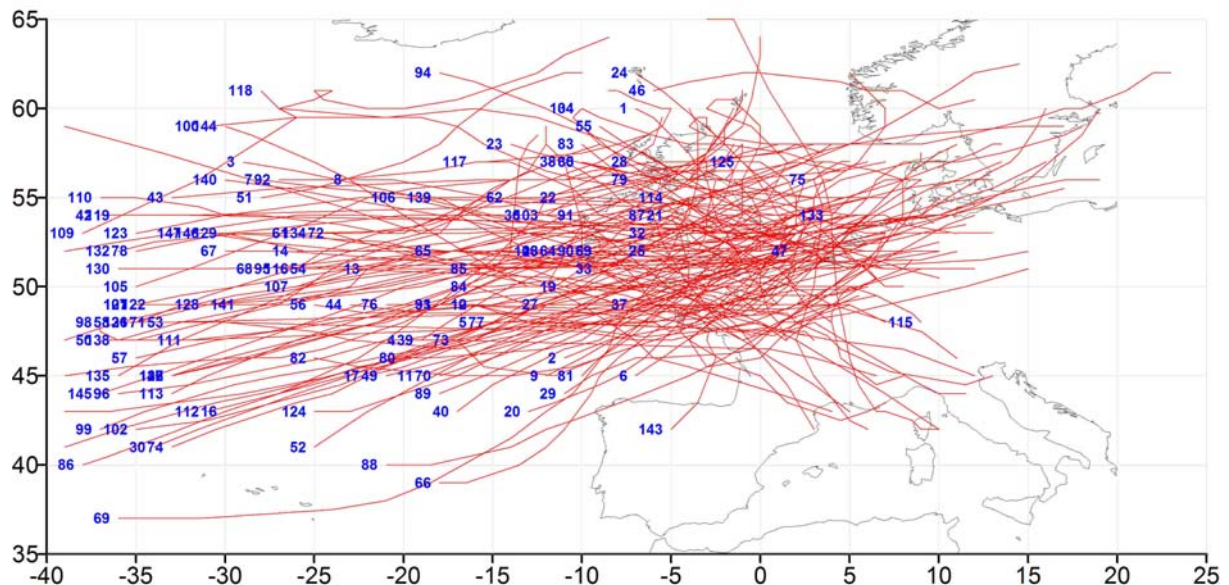


Figure 2.10 : carte de densité de trajectoires des événements tempétueux identifiés

Ci-dessous, un exemple de lame d'eau observée lors de l'événement du 16 décembre 2011.

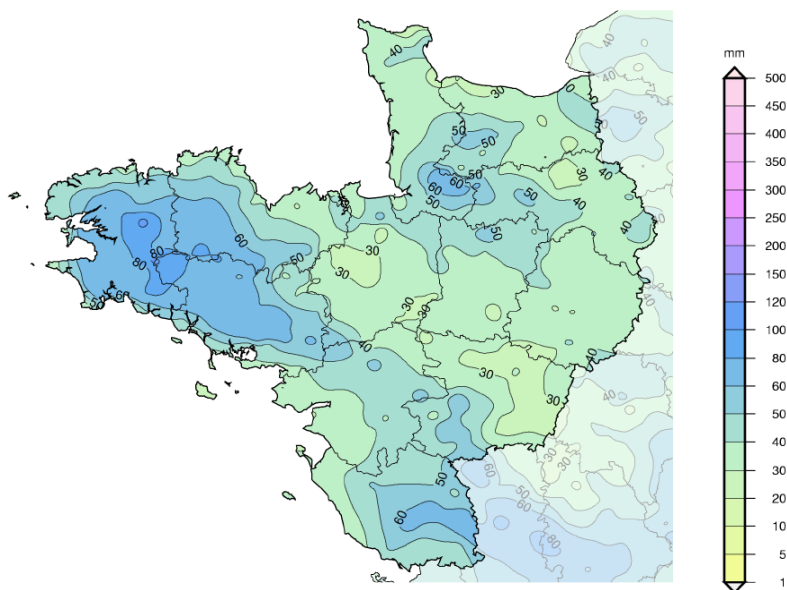


Figure 2.11 : données de cumuls pluviométriques des 15 et 16 décembre 2011 issus de la BDCLIM (krieggées et cartographiées via l'outil interne à Météo-France Climascopie)

En première analyse, on aboutit au tableau "données événements tempétueux" dont un extrait est présenté figure 2.12.

1	date heure	latitude	long	Pmer centre	Vent	cote sud	Direction	Cote sud	Vent	cote nord	Direction	cote Nord	Pmer min zone	Nom	no
770	2009021206	55	0	987,5		7 à 4	O	7 à 5		7 à 5	SO à O	1016		79	
771	2009021212	55	6	977,5		7 à 5	NO à O	6 à 4		6 à 4	N à O	1016,3		79	
772	2009021218	56	10	967,5		8 à 5	NO	8 à 5		8 à 5	NO	1018,6		79	
773	2009021300	56	13	967,5		7 à 4	NO	7 à 4		7 à 4	NO	1020,7		79	
774	2009021306	56	14	967,5		7 à 5	NO	8 à 5		8 à 5	NO	1016,2		79	
775	2009021312	56	16	967,5		9 à 5	NO	9 à 6		9 à 6	NO	1010,8		79	
776	2009021315	56	16	970		10 à 5	NO	9 à 5		9 à 5	N à NO	1010,8		79	
777	2009021318	56	16	972,5		10 à 6	N à NO	9 à 6		9 à 6	N à NO	1013,8		79	
778	2009021400	56	16	977,5		8 à 4	N à NO	7 à 5		7 à 5	N à NO	1020,2		79	
779	2006102218	46	-20	982,5		6 à 4	SO	4 à 3		4 à 3	SO à S	989,4		80	
780	2006102300	46	-17	980		4 à 6	NO à SO	4 à 3		4 à 3	NO à SO	994		80	
781	2006102306	46	-14	977,5		4 à 3	E à S	4 à 2		4 à 2	SE à S	992,4		80	
782	2006102312	47	-10	977,5		7 à 5	S	5 à 3		5 à 3	S à SE	986,5		80	
783	2006102318	49	-7	977,5		6 à 8	SO à S	6 à 3		6 à 3	S à SE	979,3		80	
784	2006102321	49,5	-5	977,5		7 à 10	SO	5 à 3		5 à 3	SO à S	979,5		80	
785	2006102400	50	-3	980		7 à 10	O à SO	7 à 5		7 à 5	NO à SO	982,8		80	
786	2006102406	52	1	985		6 à 9	NO à O	8 à 4		8 à 4	NO à O	995,3		80	
787	2006102412	54	6	987,5		4 à 5	SO à O	4		4	SO à O	1004,6		80	
788	2006112418	45	-10	980		7 à 4	SO à SE	6 à 3		6 à 3	SO à S	981,3		81	
789	2006112500	47	-8	977,5		8 à 4	SO à O	3 à 5		3 à 5	SO à S	979,8		81	
790	2006112506	50	-5	980		7 à 8	SO	4 à 5		4 à 5	S	982		81	
791	2006112509	51	-3	985		5 à 9	O à SO	6		6	O à SO	988,4		81	
792	2006112512	52	-1	987,5		6 à 4	SO	5 à 4		5 à 4	SO à O	996,9		81	
793	2006112518	55	5	995		6 à 4	SO à O	5 à 2		5 à 2	SO à S	1002,7		81	
794	2006120706	46	-25	1005		8 à 6	O à SO	6 à 5		6 à 5	O à SO	996		82	
795	2006120712	45	-20	1002,5		8 à 4	O	7 à 5		7 à 5	O	997,3		82	
796	2006120718	45	-14	995		7 à 4	O	6 à 3		6 à 3	SO	997,3		82	
797	2006120800	46	-7	985		3 à 6	SE à S	3		3	SO à SE	989,2		82	
798	2006120806	49	-2	975		9 à 7	NO à SO	6 à 4		6 à 4	NO à N	976,6		82	
799	2006120812	51	2	980		7 à 6	O à SO	6 à 3		6 à 3	NO à SO	991,3		82	
800	2006120818	54	6	982,5		7 à 3	NO	6 à 3		6 à 3	NO à SO	998,7		82	
801	2006120900	57	9	985		6 à 4	NO	6 à 2		6 à 2	NO à SO	1004,8		82	
802	2007031818	58	-10	992,5		8 à 4	NO	7 à 4		7 à 4	NO à O	1009,8		83	
803	2007031900	54	-5	992,5		8 à 5	NO	8 à 4		8 à 4	NO à O	1003,1		83	
804	2007031906	51	1	992,5		9 à 5	NO	9 à 5		9 à 5	NO	998,5		83	
805	2007031909	50	2	992,5		10 à 5	NO	9 à 6		9 à 6	NO	998,9		83	
806	2007031912	49	3	992,5		9 à 6	NO	9 à 5		9 à 5	NO à N	1000,7		83	
807	2007031918	51	8	992,5		9 à 3	NO à N	9 à 5		9 à 5	NO à N	1005,2		83	
808	2007031921	51,5	8,5	995		9 à 5	NO à N	8 à 6		8 à 6	NO à N	1007,2		83	
809	2007032000	52	9	995		9 à 5	NO à N	8 à 6		8 à 6	NO à N	1008,4		83	
810	2008011600	48	-10	987,5		6 à 4	O à SO	5 à 4		5 à 4	SO à O	988,7		84	
811	2008011606	50	-4	987,5		5 à 4	N à SO	3		3	SO à S	989,8		84	
812	2008011612	50	-1	992,5		6 à 4	O à SO	6 à 3		6 à 3	NO à SO	994,3		84	
813	2008011615	51,5	0,5	995		7 à 5	NO à O	7 à 3		7 à 3	NO à O	997,3		84	
814	2008011618	53	2	997,5		7 à 5	NO	6 à 4		6 à 4	NO	1001,8		84	
815	2009012212	51	-16	982,5		3 à 5	SO à O	4 à 3		4 à 3	O à SO	991,9		85	
816	2009012218	51	-10	975		6 à 3	SE à SO	3 à 4		3 à 4	S	985,5		85	

Figure 2.12 : extrait du tableau "données événements tempétueux"

A chaque tempête est associé un numéro noté dans la colonne "no" du fichier.

A titre d'illustration, les lignes 770 à 778 correspondent à l'événement tempête n°79 de la "date_critère" du 13 février 2005. Cet événement couvre la période du 12 février 2005 à 06 UTC (ligne 770) au 14 février 2005 à 00 UTC (ligne 778).

Les latitudes et longitudes des lignes 770 à 778 permettent le tracé de la trajectoire de l'événement tempétueux.

Les cartes des réanalyses du Centre Européen de Prévisions à moyen terme sont utilisées pour composer la trajectoire de chaque tempête. La réanalyse ERA 40 est utilisée pour les situations entre 1957 et 1979 et la réanalyse ERA-INTERIM pour les situations entre décembre 1979 et 2012.

La figure suivante montre comment le minimum de pression associé au système étudié est repéré par le positionnement du curseur de l'outil de pointage susmentionné ; dans le cas du 12 février 2005 il s'agit d'un minimum fermé, pas dans celui du 29 octobre 1990.

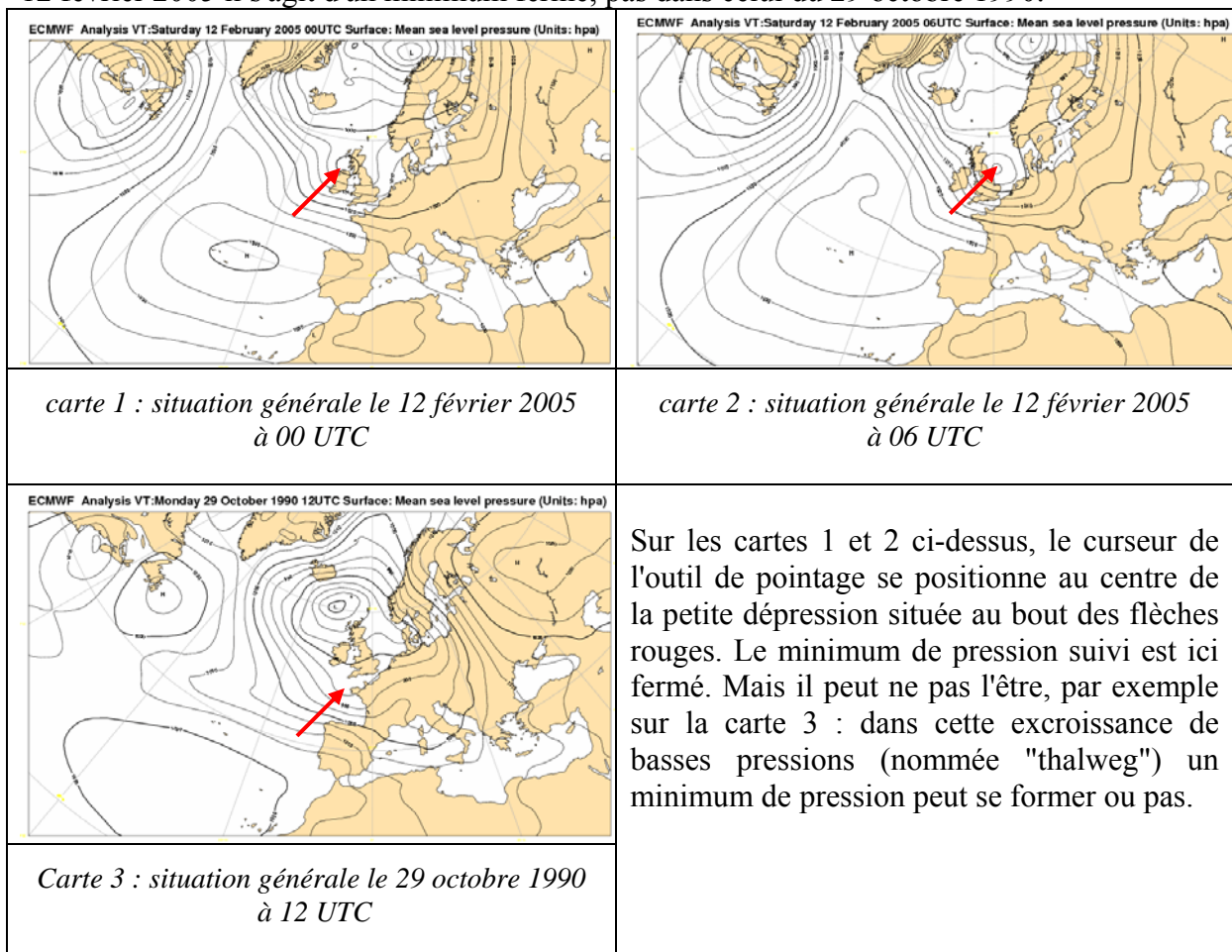


Figure 2.13 : méthode de repérage du minimum de pression associé à un événement tempétueux

Les coordonnées latitude et longitude du centre de la dépression (flèches rouges) sont pointées dans le tableau "données événements tempétueux" dans les colonnes "latitude" et "long" toutes les 6 heures ou quelquefois toutes les 3 heures, avec alors interpolation de la position puisque les cartes des réanalyses ne sont disponibles que toutes les 6 heures.

La pression au centre de la dépression ou dans le thalweg est notée dans la colonne "pmer centre"

Dans les colonnes "Vent côte sud" et "Vent côte Nord" est décrite au mieux la force du vent (en Beaufort), sur la côte concernée, à partir des cartes de la Base de Données Météorologiques (exemple carte 4). Le premier chiffre de la colonne correspond à la force du vent la plus élevée sur la partie Ouest de la côte considérée et le second à la force du vent la plus élevée sur la partie Est de cette même côte.

Remarque : pour la colonne "Vent côte Nord", la description du vent correspond au domaine géographique de la côte bretonne uniquement.

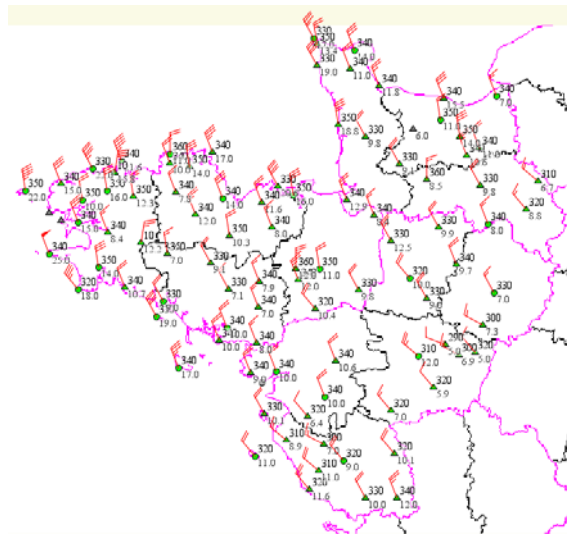


Figure 2.14 : carte 4 des vents à 10 mètres observés le 13 février 2005 à 15 UTC

Dans les colonnes "Direction côte sud" et "Direction côte nord" est décrite au mieux la direction du vent (en lettres) sur cette côte à partir des cartes de la Base de Données Météorologiques (exemple carte 4). En général, la première direction correspond à la direction sur l'Ouest de la côte considérée et la seconde à la partie Est ; mais ce n'est pas toujours le cas. Pour les directions de vent sur la côte considérée il est nécessaire de visualiser la carte pour une bonne compréhension.

Remarque : pour la colonne "Direction côte Nord" la description de la direction correspond à la côte bretonne uniquement.

Dans la colonne "pmer min zone" est notée la pression au niveau de la mer minimale observée sur la Bretagne à l'échéance étudiée. Cette pression mer est déduite des cartes de la Base de Données Météorologiques (exemple carte 5).

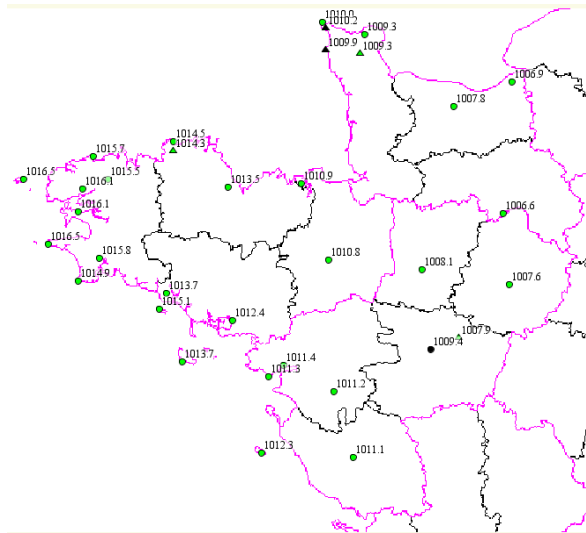


Figure 2.15 : carte 5 des pressions mer observées le 13 février 2005 à 15 UTC

2.3.2. Fiches descriptives des vimers identifiées

Pour chaque événement tempête une fiche de synthèse est élaborée. Elle comporte :

- la situation générale commentée avec 3 cartes
- la carte de la trajectoire de l'événement étudié
- la carte de la pression mesurée la plus basse sur la Bretagne avec un commentaire précisant la localisation
- une information sur la localisation de la plus forte baisse et de la plus forte hausse de pression observées pendant l'événement. Ces valeurs sont issues des observations tri-horaires disponibles dans la base de données de Météo-France pour les stations suivantes : pointe de Chassiron, île d'Yeu, Saint-Nazaire – Montoir, Belle-Ile – Le Talut, île de Groix, pointe de Penmarc'h, pointe du Raz, île d'Ouessant, Brignogan, île de Batz, île de Bréhat, Cancale, Granville et pointe de la Hague
- la carte de la force maximale du vent moyen mesurée sur la Bretagne avec un commentaire précisant la localisation, la carte du cumul de précipitation sur 24, 48 ou 72 heures, principalement sur la Bretagne mais parfois sur les régions adjacentes
- un paragraphe sur l'état de la mer : hauteur de vagues, surcotes (renseigné ou non)
- un paragraphe sur des dégâts connus (renseigné ou non)

Certaines tempêtes (comme celle du 6 juillet 1969 ou encore, celle des 15-16 octobre 1987) comportent plus de renseignements parce qu'elles ont fait l'objet d'études antérieures approfondies.

Les fiches descriptives des tempêtes analysées durant l'étude figurent en annexe.

3. TYPOLOGIE DES TEMPÊTES

Le travail de recensement décrit précédemment a permis d'obtenir un échantillon de 147 événements tempétueux sur la période 1979/2012 (sauf 5, avant 1979). La méthode décrite montre que cet inventaire, sans être exhaustif, peut néanmoins être considéré comme représentatif de la période. Il s'agit maintenant dans cette partie de décrire statistiquement ces événements en fonction de leurs caractéristiques géographiques et/ou météorologiques. Les résultats présentés pourront encore, si besoin, être affinés dans l'étude VIMERS-1.

La figure suivante reprend l'ensemble des trajectoires des 147 événements retenus, suivis tant qu'ils se déplacent dans le domaine d'étude délimité par les méridiens 40 °Ouest et 20 °Est et les parallèles 35 °Nord et 65 °Nord. Il apparaît nécessaire de tenter de réaliser une typologie statistique sur cet échantillon de tempêtes.

Trajectoires de tous les événements tempêtes étudiés

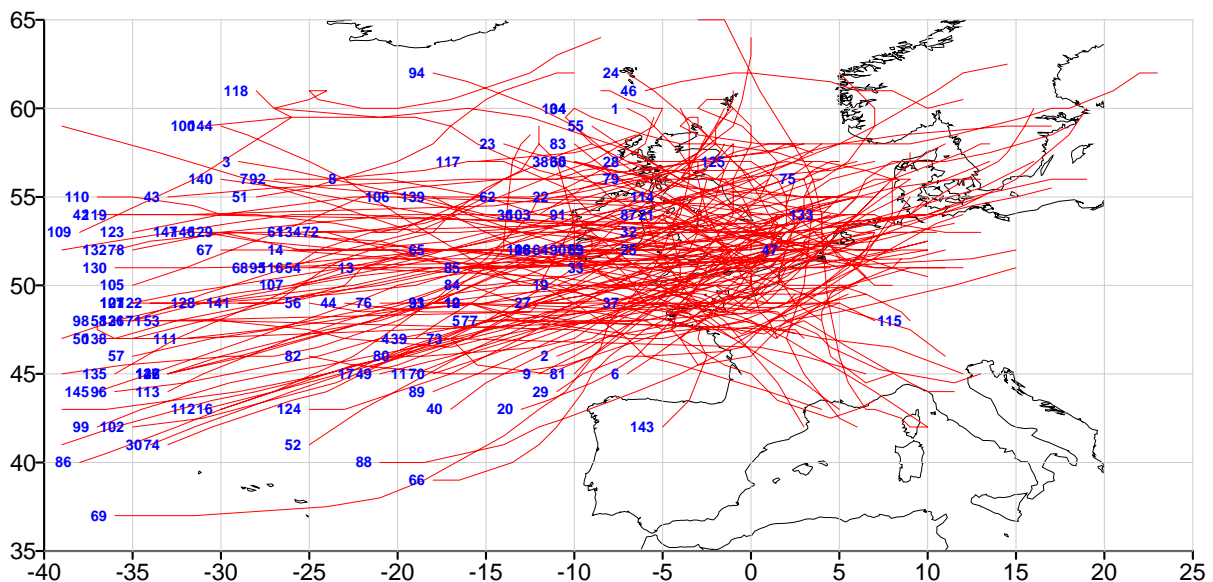


Figure 3.1 : trajectoires des 147 événements tempêtes sélectionnés

Outre l'objectif d'essayer d'identifier plusieurs groupes de tempêtes bien "**distincts**" entre eux et composés chacun d'éléments "**semblables**", la classification recherchée doit également apporter une aide :

- au choix d'événements tempêtes **typiques** et **atypiques** pour les tests de modélisation ultérieurs ;
- à la caractérisation d'une tempête ancienne par le meilleur analogue.

Une phase préliminaire de traitements des éléments saisis manuellement dans le "tableau événements tempétueux" décrit dans la deuxième partie est tout d'abord nécessaire pour pouvoir appliquer ensuite des méthodes statistiques de classification.

3.1. Transformation du tableau événements tempétueux

3.1.1. Homogénéisation du pas de temps

Dans le tableau événements tempétueux, une tempête est décrite sur plusieurs lignes, dont le nombre est fonction de la durée pendant laquelle la tempête est suivie dans le domaine d'étude, mais aussi du pas de temps utilisé pour décrire la tempête, pas de 3 heures, ou pas de 6 heures ou mélange des deux pas. Le choix du pas de temps est fait au moment de la constitution du tableau en fonction de l'évolution au fil du temps, plus ou moins régulière, de chaque tempête : lorsque, a priori, une tempête semble évoluer continûment sur 6 heures, le pas de temps 3 heures n'est pas utilisé.

La figure 3.2 suivante prend l'exemple de trois événements tempétueux décrits sur des durées variables et à des pas de temps différents :

- le premier correspond à la date_critères du 06/07/1969 ; l'événement tempétueux est décrit sur un jour et demi, toutes les 3 heures (soit 11 lignes) ;
- le deuxième correspond à la date_critères du 08/12/1990 ; l'événement tempétueux est décrit sur presque 4 jours, toutes les 6 heures (soit 16 lignes) ;
- le troisième correspond à deux dates_critères, les 26 et 27/02/1990, l'événement tempétueux est décrit sur un peu plus de deux jours, toutes les 6, 3, 6, 3 et 6 heures (soit 17 lignes).

Date heure	Latitude	Longitude	Pmer centre	Vent côte sud	Direction Côte sud	Vent côte nord	Direction côte Nord	Pmer min zone
...								
1969070600	49	-16	1012.5	3	NO	3	O	1015
1969070603	48.5	-14	1012.5	3	NE	3	O	1015
1969070606	48	-12	1012.5	3	E	3	SE à O	1015
1969070609	48	-10	1007.5	4	SE	3	SE	1010
1969070612	48	-7	1002.5	6 à 4	SO	5 à 2	SE	1009.4
1969070615	48	-5.5	1002.5	8 à 4	S	6 à 3	S à SE	1002.9
1969070618	48.2	-3.5	995	11 à 6	NO à SO	11 à 6	N à SE	995
1969070621	48.5	-1.5	995	8 à 6	NO	9 à 3	NO à S	998
1969070700	49.5	0	995	7 à 5	NO	6 à 5	NO	1002.7
1969070703	50.5	1	990	6 à 4	NO	6 à 7	NO	1010
1969070706	52	3	992.5	7 à 4	NO	5 à 8	NO	1015
...								
1990120706	55	-5	1005					1018.6
1990120712	54	-3	1002.5					1012.7
1990120718	53	-2	997.5	6 à 4	SO	5 à 4	NO à S	1004.6
1990120800	53	-1	992.5	8 à 4	NO à O	7 à 4	NO	1004.5
1990120806	53	0	987.5	10 à 4	NO	9 à 6	N à O	996.1
1990120812	52	0	987.5	8 à 4	NO	7 à 4	N à NO	998.8
1990120818	52	0	987.5	6 à 2	NO	4 à 5	NO à SO	999.3
1990120900	52	-2	990					
1990120906	50	-3	992.5					
1990120912	48	-5	995					
1990120918	47	-4	995					
1990121000	46	-3	995					
1990121006	45	0	996					
1990121012	42	3	995					
1990121018	43	6	995					
1990121100	44	8	995					
...								
1990022512	55	-33	977.5	9 à 6	SO	7 à 5	SO	1010.8
1990022518	56	-21	970	6 à 5	O à SO	6 à 5	O	1010
1990022600	56	-11	962.5	9 à 5	SO	8 à 5	SO à O	1007.5
1990022603	56.5	-6.5	957.5	10 à 5	SO à O	8 à 6	O à SO	1004.2
1990022606	57	-2	952.5	10 à 6	O à SO	8 à 6	O	1001.3
1990022609	57.5	0.5	950	9 à 6	O à SO	7 à 10	O	1001
1990022612	58	3	950	9 à 5	NO à O	7 à 10	O à NO	1003.7
1990022615	57.75	1.75	950	7 à 4	NO	6 à 8	O à NO	1007.9
1990022618	58	9	950	8 à 4	NO à O	7 à 8	O à NO	1009.5
1990022700	59	14	945	8 à 4	O à SO	8 à 6	O	1006.5
1990022703	59.5	15.5	945	10 à 6	O à SO	9 à 7	O à SO	1002.2
1990022706	60	17	942.5	10 à 6	O	8 à 10	O à NO	999.4
1990022709	60	18	942.5	10 à 6	NO à O	9	NO à O	1004.2
1990022712	60	19	942.5	8 à 5	NO à O	8 à 10	NO	1006.8
1990022715	61	20.5	942.5	10 à 5	NO	8 à 10	O à NO	1009.9
1990022718	62	22	942.5	7 à 4	NO	7 à 9	O à NO	1012.1
1990022800	62	24	947.5	5 à 3	O	5 à 8	O	1014.6
...								

Figure 3.2 : extraits du tableau événements tempétueux montrant la non-homogénéité de la description des différents événements

Dans un premier temps donc, toutes les positions des centres dépressionnaires associés aux événements tempétueux sont déterminées au même pas de temps de trois heures (pas de temps minimal du tableau événements tempétueux). La position intermédiaire de deux positions déterminées à 6 heures d'intervalle est située naturellement à mi-chemin, l'évolution sur 6 heures étant supposée régulière.

La figure suivante montre sur l'exemple de l'événement tempétueux rattaché à la date_critères du 27/05/2007 le passage d'une trajectoire décrite toutes les 6 heures à une trajectoire documentée toutes les 3 heures.

Date heure	Latitude	Longitude
2007052518	53	-31
2007052600	52	-25
2007052606	52	-20
2007052612	51	-15
2007052618	50	-11
2007052700	50	-8
2007052706	50	-6
2007052712	50	-4
2007052718	49	-1.5
2007052800	48.5	1
2007052806	49	2
2007052812	50	3

Création de points à mi-chemin entre deux positions espacées de 6 h

Date heure	Latitude	Longitude
2007052518	53	-31
	52.5	-28
2007052600	52	-25
	52	-22.5
2007052606	52	-20
	51.5	-17.5
2007052612	51	-15
	50.5	-13
2007052618	50	-11
	50	-9.5
2007052700	50	-8
	50	-7
2007052706	50	-6
	50	-5
2007052712	50	-4
	49.5	-2.75
2007052718	49	-1.5
	48.75	-0.25
2007052800	48.5	1
	48.75	1.5
2007052806	49	2
	49.5	2.5
2007052812	50	3

Figure 3.3 : construction d'une trajectoire tri-horaire à partir d'une trajectoire hexa-horaire

3.1.2. Définition de nouvelles variables

Pour réaliser la typologie, il faut qu'à chaque événement tempétueux ne corresponde qu'une seule ligne descriptive : de nouvelles variables synthétiques sont donc calculées à partir du tableau événements tempétueux. Pour éviter de trop perdre de l'information dense qui y est consignée, un large panel de variables est proposé. Plusieurs classifications seront testées ultérieurement à partir de différentes sélections de ces variables, pour ne garder que la classification qui semble la plus pertinente. Les variables synthétiques peuvent être classées en deux groupes : les variables se rapportant à l'ensemble de l'événement tempétueux et les variables se rapportant seulement à la (ou les) date(s)_critères de l'événement tempétueux.

Cette phase de définition de nouvelles variables est illustrée dans les figures ci-après, pour l'événement tempétueux correspondant à la date_critères du 27/05/2007.

- Variables se rapportant à l'ensemble de l'événement tempétueux

Date heure	Latitude	Longitude	Heure	Pmer centre	v (km/h)	u (km/h)	Direction déplacement	Module déplacement (km/h)
2007052518	53	-31	18	1012.5	premier	premier	premier	premier
	52.5	-28			-18.5	67.3	285	69.8
2007052600	52	-25	0	1012.5	-18.5	68.1	285	70.6
	52	-22.5			0	57.1	270	57.1
2007052606	52	-20	6	1005	0	57.1	270	57.1
	51.5	-17.5			-18.5	57.4	288	60.3
2007052612	51	-15	12	1002.5	-18.5	58	288	60.9
	50.5	-13			-18.5	46.9	292	50.4
2007052618	50	-11	18	1000	-18.5	47.4	291	50.9
	50	-9.5			0	35.7	270	35.7
2007052700	50	-8	0	995	0	35.7	270	35.7
	50	-7			0	23.8	270	23.8
2007052706	50	-6	6	990	0	23.8	270	23.8
	50	-5			0	23.8	270	23.8
2007052712	50	-4	12	982.5	0	23.8	270	23.8
	49.5	-2.75			-18.5	29.9	302	35.2
2007052718	49	-1.5	18	985	-18.5	30.2	301	35.5
	48.75	-0.25			-9.3	30.5	287	31.9
2007052800	48.5	1	0	990	-9.3	30.6	287	32
	48.75	1.5			9.3	12.2	233	15.4
2007052806	49	2	6	995	9.3	12.2	233	15.3
	49.5	2.5			18.5	12.1	213	22.1
2007052812	50	3	12	995	18.5	12	213	22.1

Figure 3.4.1 : tableau permettant de définir des variables synthétiques sur l'ensemble d'un événement

A partir des 5 premières colonnes issues du tableau des événements tempétueux, dans lesquelles ont été intercalées des positions tri-horaires le cas échéant, peuvent être calculées : la durée totale pendant laquelle l'événement tempétueux est suivi, la longueur totale de la trajectoire, les latitudes et longitudes du premier point et du dernier point de la trajectoire, la pression minimale sur tout l'événement du centre dépressionnaire associé (respectivement dans l'exemple : duree = 66 heures, long_traj = 2 559 km, lat1= 53 °N, lat2 = 50 °N, lon1 = 31 °O, lon2 = 3 °E, PC_tot = 982,5 hPa).

Les quatre dernières colonnes se déduisent des colonnes 2 et 3 donnant la position toutes les 3 heures du centre dépressionnaire ; peuvent y être lus les déplacements tri-horaires de ce centre (composantes méridienne et zonale en km/h en colonnes 6 et 7, direction d'où vient le centre en degrés sur une rose de 360 ° et module en km/h en colonnes 8 et 9).

A partir de ces quatre dernières colonnes peuvent être définies les variables suivantes :

- ✓ le déplacement tri-horaire maximal de l'événement (ici U_depmax = 68,1 km/h, V_depmax = -18,5 km/h, dd_depmax = 285 °, ff_depmax = 70,6 km/k, sect_depmax = "O") ;
- ✓ le vecteur déplacement tri-horaire moyen (ici Umoy = 36 km/h, Vmoy = -5 km/h, dd_dep moy = 278 °, ff_dep moy = 37 km/h, sect_dep moy = "O") ;
- ✓ la moyenne des modules des déplacements tri-horaires (ici moy_ff_qq_dd = 39 km/h).

• **Variables se rapportant à la (ou les) date(s)_critères de l'événement tempétueux**

Date heure	Latitude	Longitude	Pmer centre	Vent côte sud	Direction Côte sud	Vent côte nord	Direction côte Nord	Pmer min zone
2007052518	53	-31	1012.5					1006.5
2007052600	52	-25	1012.5					1007.9
2007052606	52	-20	1005					1007.1
2007052612	51	-15	1002.5					1006.7
2007052618	50	-11	1000					1006.2
2007052700	50	-8	995	6 à 4	SO à O	6 à 2	S à SO	1000.8
2007052706	50	-6	990	6 à 5	O à SO	6 à 4	O à S	993.6
2007052712	50	-4	982.5	9 à 6	NO à O	9 à 4	NO à SO	983.1
2007052718	49	-1.5	985	10 à 5	NO à O	9 à 3	NO à N	987.7
2007052800	48.5	1	990	10 à 6	NO	9 à 4	N	994.4
2007052806	49	2	995	8 à 5	NO	7 à 5	NO à N	1001.7
2007052812	50	3	995					1008.2

Figure 3.4.2 : extrait du tableau événements tempétueux permettant de définir des variables synthétiques sur la date_critères du 27/05/2007

Dans l'extrait du tableau événements tempétueux ci-dessus, seules les lignes encadrées en rouge sont utilisées pour calculer les variables synthétiques de la date_critères du 27/05/2007. Il s'agit de :

- ✓ la pression minimale du centre dépressionnaire associé à l'événement et la pression minimale atteinte sur la région pendant la date_critères (ici PC_S = 982,5 hPa, Pzmin = 983,1 hPa) ;
- ✓ les forces maximales de vent pour chaque côte pendant la date_critères (ici ffS_max = 10 B et ffN_max = 9 B) ;
- ✓ un vecteur déplacement de la dépression au moment du minimum de pression sur la Bretagne (ici le 27/05/2007 à 12 UTC : U_Pzmin = 23,8 km/h, V_Pzmin = 0 km/h, dd_Pzmin = 270 °, ff_Pzmin = 23,8 km/h, sect_Pzmin = "O") ;
- ✓ trois distances aux côtes bretonnes au moment du minimum de pression sur la Bretagne ; les points de référence sont situés près de la pointe de Crozon (48,3 °N, 4,6 °O), près de l'estuaire de la Loire (47 °N, 2 °O) et près de Jersey (49 °N, 2 °O) (ici respectivement : dist_pte = 194 km, dist_estuai = 365 km, dist_jers = 182 km).

Les nouvelles variables définies a priori pour alimenter la phase de typologie statistique sont énumérées ci-dessous (en gras leurs noms raccourcis utilisés par la suite).

- **variables concernant l'ensemble de l'événement**

- ✓ latitude et longitude du point initial (**lat1, lon1**)
- ✓ latitude et longitude du point final (**lat2, lon2**)
- ✓ longueur totale de la trajectoire (**long_traj**)
- ✓ durée totale pendant laquelle l'événement tempétueux est suivi (**duree**)
- ✓ pression minimale du centre dépressionnaire sur tout l'événement (**PC_tot**)
- ✓ déplacement moyen du centre dépressionnaire sur tout l'événement tempétueux (**Umoy, Vmoy, dd_dep moy, ff_dep moy, sect_dep moy**)
- ✓ déplacement maximal du centre dépressionnaire sur tout l'événement tempétueux (**U_dep max, V_dep max, dd_dep max, ff_dep max, sect_dep max**)
- ✓ moyenne des modules des déplacements (**moy_ff_qq_dd**)

- **variables concernant la (ou les) date(s)_critères de l'événement tempétueux**

- ✓ pression minimale sur zone pendant la (les) date(s)_critères (**Pzmin**)
- ✓ pression minimale du centre dépressionnaire pendant la (les) date(s)_critères (**PC_S**)
- ✓ force du vent maximale pendant la (les) date(s)_critères sur la côte Sud (**ffS_max**)
- ✓ force du vent maximale pendant la (les) date(s)_critères sur la côte Nord (**ffN_max**)
- ✓ distance du centre dépressionnaire à la Bretagne au moment de Pzmin, par rapport à la pointe de Crozon (**dist_pte**), par rapport à l'estuaire de la Loire (**dist_estuai**) et par rapport à Jersey (**dist_jers**)
- ✓ déplacement du centre dépressionnaire au moment de Pzmin (**U_Pzmin, V_Pzmin, dd_Pzmin, ff_Pzmin, sect_Pzmin**)

3.1.3. Quelques statistiques à partir des nouvelles variables

Outre des informations intéressantes sur l'échantillon étudié des 147 événements tempétueux, les statistiques calculées à partir des variables synthétiques susmentionnées apportent des éléments pour détecter, afin de les corriger, les éventuelles erreurs de frappe qui ont pu se glisser lors de la saisie manuelle du tableau événements tempétueux.

Pour éviter des redondances, les statistiques de toutes les variables synthétiques ne sont pas présentées ici.

3.1.3.1. Les déplacements moyens

- Directions du déplacement moyen vectoriel

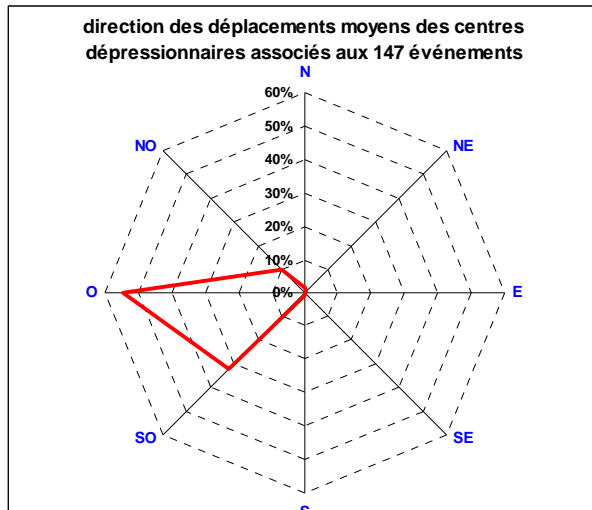


Figure 3.5 : direction des déplacements des centres dépressionnaires moyennés sur l'ensemble de leur trajectoire

Les déplacements moyens sont essentiellement axés O→E, SO→NE et NO→SE.

Deux seulement sont axés N→S, ils correspondent aux dates_critères du 30/01/2003 et du 20/02/1996.

Une trajectoire moyenne est axée NE→SO (pour la date_critères du 10/12/1990), et une autre est axée S→N (le 30/01/1988).

Le graphique suivant présente la moyenne en km/h des modules des déplacements tri-horaires des dépressions le long de leur trajectoire (paramètre moy_ff_qq_dd), donc indépendamment des directions tri-horaires. Il apparaît sur les 147 trajectoires des groupes de tempêtes se déplaçant plus ou moins rapidement (les plus rapides parcourent plus de 100 km en une heure).

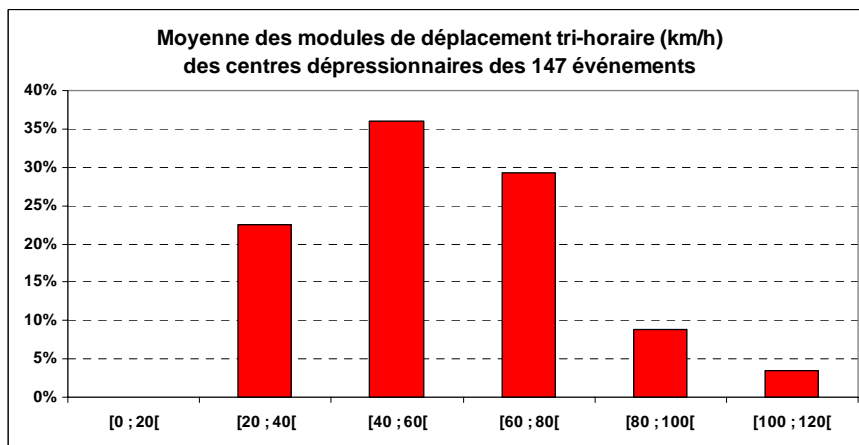


Figure 3.6 : distribution de la moyenne des modules tri-horaires de déplacement des événements tempétueux

Avec une moyenne de 22 km/h, l'événement tempétueux relatif à la date_critères du 30/03/2010 est le plus lent, tandis que l'événement tempétueux associé au 23/11/1984 est le plus rapide (moyenne de 118 km/h).

3.1.3.2. Les distances à la région

Le graphique suivant renseigne sur la distance à Jersey des centres dépressionnaires associés aux événements tempétueux au moment des minimums de pression sur la Bretagne (pourcentage par intervalle de distances en km).

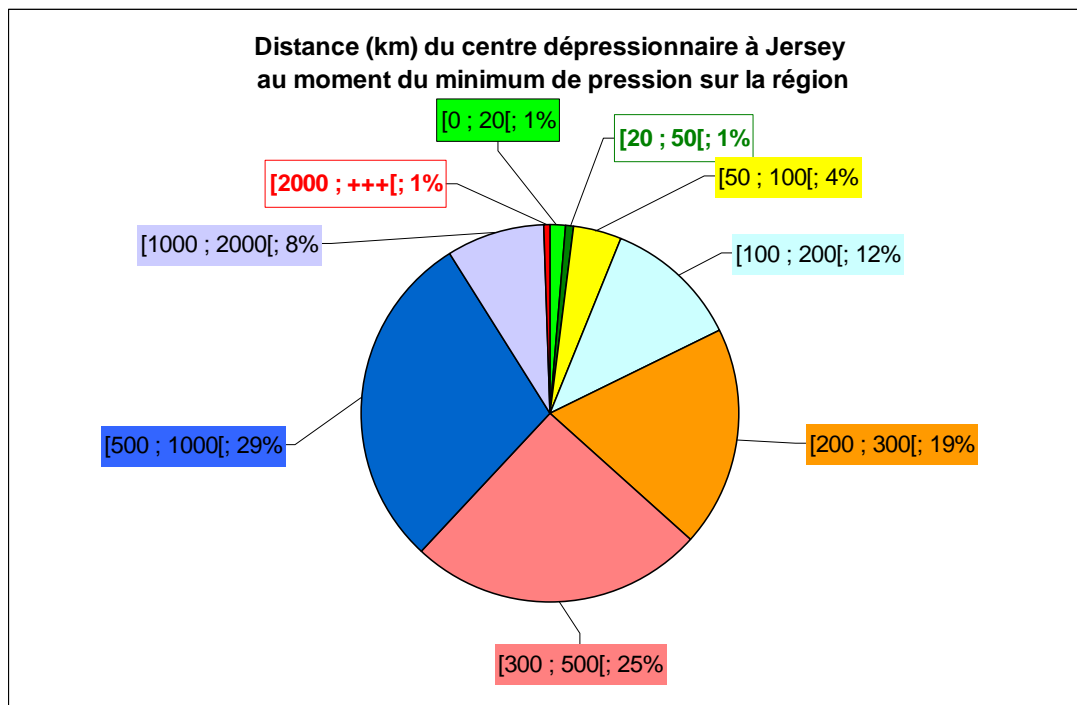


Figure 3.7 : distances au moment du minimum de pression sur la Bretagne entre Jersey et le centre dépressionnaire associé à chacun des 147 événements tempétueux

Plus de la moitié des distances sont comprises entre 300 et 1 000 km (les pourcentages sont un peu plus élevés si la pointe de Crozon ou l'estuaire Loire sont pris comme points de référence pour le calcul des distances).

Pour les trois points de référence, il existe au moins un cas (le même en fait) pour lequel la distance est supérieure à 2 000 km ; en revanche, un centre d'action qui passe à moins de 20 km du point de référence au moment du minimum de pression sur la Bretagne n'est signalé que pour le point à proximité de Jersey.

Le tableau suivant résume les cas extrêmes pour les trois points de référence.

Références	Plus petite distance	Plus grande distance
Pointe Crozon	12 et 13/09/1993 (23 km)	19/12/1989 (2 130 km)
Estuaire Loire	06/02/1996 et 26/01/2001 (76 km)	19/12/1989 (2 351 km)
Jersey	04/12/1992 et 08/12/2006 (~0 km)	19/12/1989 (2 317 km)

3.1.3.3. Les pressions

Ci-dessous est représentée la distribution des pressions minimales enregistrées sur la Bretagne (Pzmin) lors des dates_critères des 147 événements tempétueux.

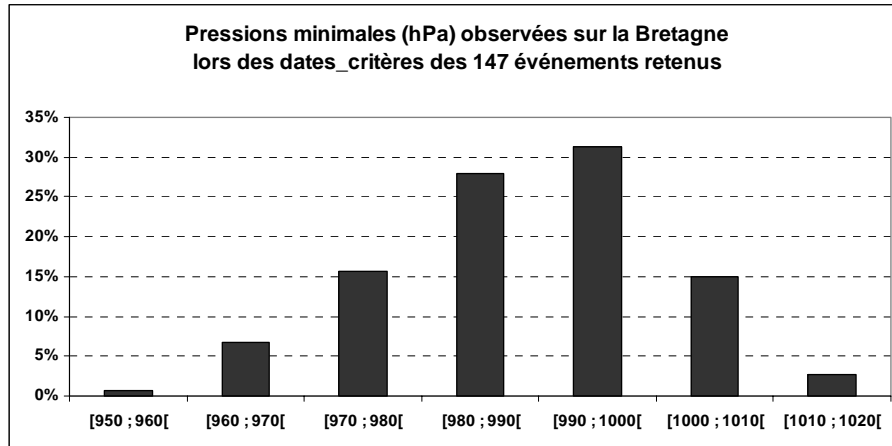


Figure 3.8 : distribution de la pression minimale observée sur la Bretagne lors des dates_critères des événements tempétueux

Ainsi, 31 % des événements induisent une pression minimale comprise entre 990 et 1000 hPa. Les tempêtes associées à des pressions inférieures à 970 hPa sont rares mais représentent tout de même près de 8 % de l'échantillon. C'est le cas par exemple des 25 et 26/02/1989 avec des valeurs respectivement de 954 et 960 hPa observées sur la Bretagne ou le 16/10/1987 avec 960 hPa.

Il est à noter a contrario que lors de certains événements tempétueux, les pressions observées en Bretagne peuvent rester relativement "élevées", supérieures à 1010 hPa : ainsi, le 27/02/1993 ou le 20/02/1996 avec 1012 hPa ; en fait les conditions météorologiques de ces deux événements sont plus gouvernées par l'évolution d'un puissant anticyclone situé à l'Ouest de la Bretagne que par celle du thalweg (axe de basses pressions) positionné à l'Est (on y reviendra lors de la description de la typologie retenue).

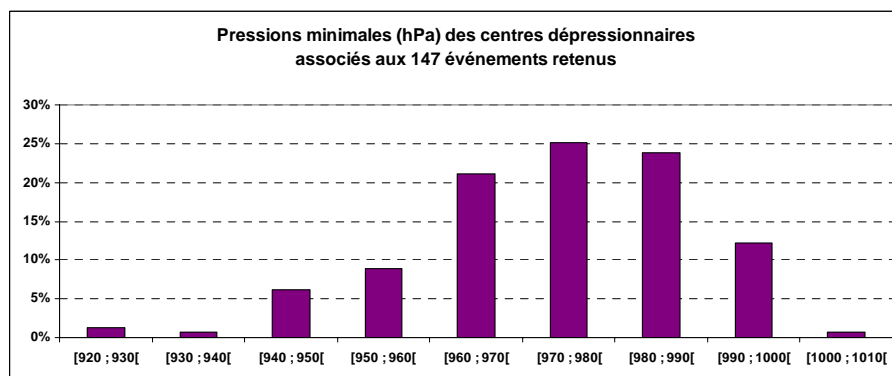


Figure 3.9 : distribution de la pression minimale des centres dépressionnaires associés aux 147 événements tempétueux

70 % des 147 pressions minimales calculées sur toute la durée de chacun des événements tempétueux (PC_tot) sont comprises entre 960 et 990 hPa. Trois sont inférieures à 940 hPa : le 10/01/1993 (avec 920 hPa), le 24/12/1989 (avec 927,5 hPa) et le 29/01/1990 (avec 937,5 hPa).

3.1.3.4. Les vents en Beaufort sur les deux côtes Nord et Sud

Le graphique suivant permet de comparer les deux côtes en termes de forces des vents maximales observées lors des dates_critères des 147 événements étudiés (forces en Beaufort).

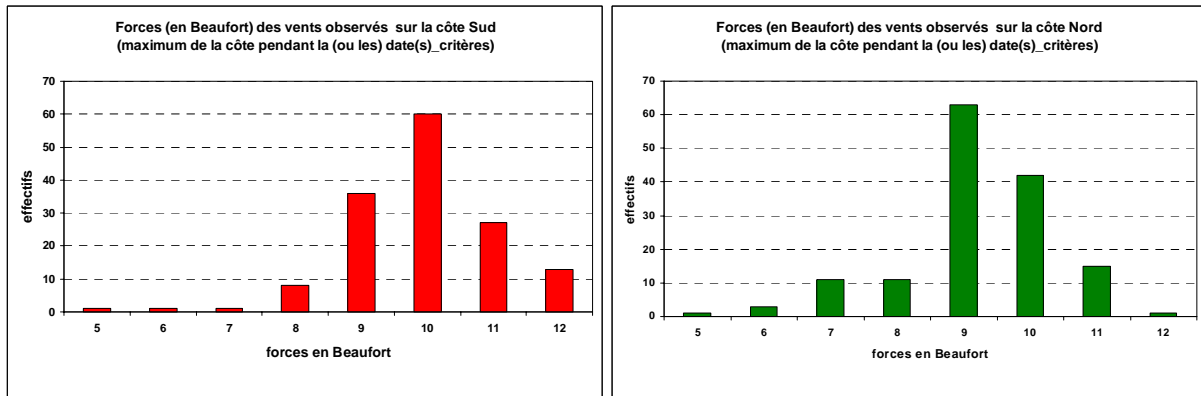


Figure 3.10 : effectifs par côte des forces maximales en Beaufort des vents observés

Parmi les dates_critères des 147 événements tempétueux étudiés, la force 12 B a été atteinte 13 fois sur la côte Sud et 1 seule fois sur la côte N (le 13/02/1972 : ce jour-là, les 12 B sont observés sur les deux côtes).

La force 10 B a été plus souvent dépassée en au moins un point de la façade atlantique qu'en bordure de Manche. Pour 7 événements, il a même été relevé plus de 10 B au Sud et "seulement" 8 B au Nord ; l'inverse ne s'est produit que pour un seul événement, le 26/02/1989.

Néanmoins, dans 49 cas (le tiers des cas), les 10 B sont dépassés sur les deux côtes.

A l'opposé, le 28/01/2001, le 16/01/2008 et le 24/12/2009, les forces des vents restent en dessous de 7 B sur chacune des deux côtes.

3.2. Méthode générale de classification

Le schéma suivant décrit la méthode de classification proprement dite utilisée dans cette étude. Il s'agit d'une succession de plusieurs étapes, chacune d'entre elles nécessitant une expertise qui peut amener à interrompre le processus si les résultats intermédiaires ne donnent pas satisfaction. Cette méthode a déjà été souvent utilisée et éprouvée lors d'études antérieures.

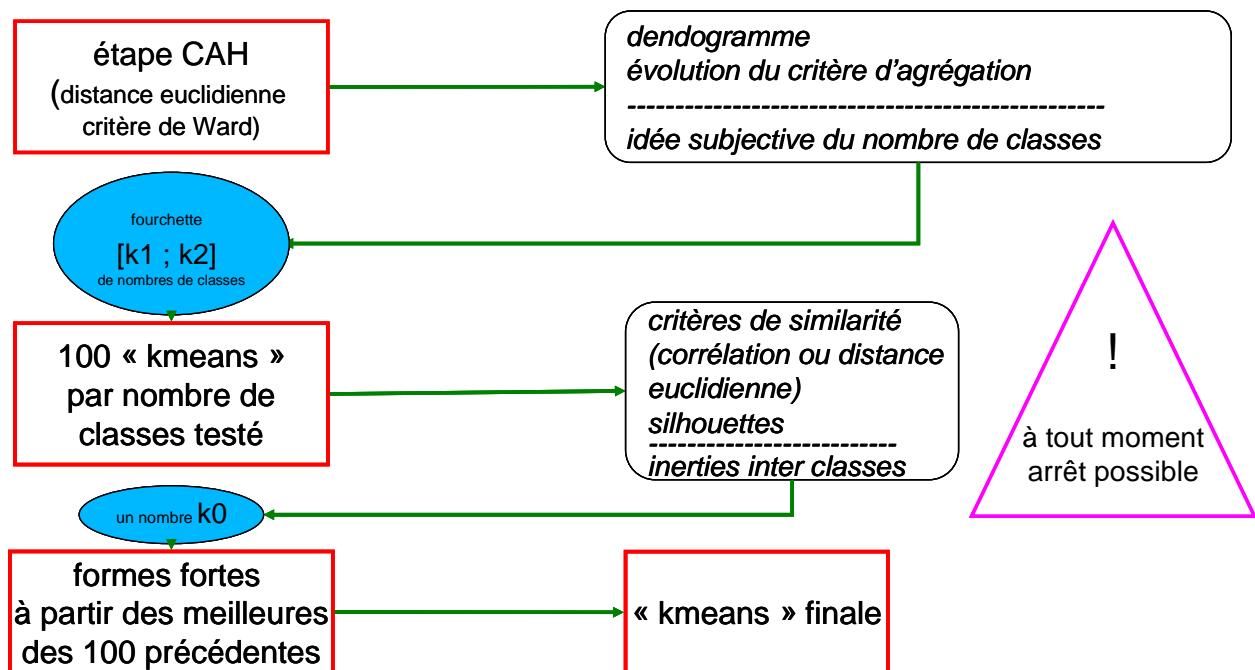


Figure 3.11 : déroulement de la procédure de classification

La procédure fait intervenir deux méthodes statistiques de classification classiques souvent utilisées ensemble, car complémentaires : la classification hiérarchique ascendante (CAH par la suite) et la méthode "kmeans".

La première méthode part d'une situation où tous les individus constituent chacun une classe singleton, puis sont rassemblés par étapes successives en classes de plus en plus grandes jusqu'à obtenir la classe triviale constituée de tous les individus.

À chaque étape donc, deux classes sont fusionnées ; elles sont choisies en fonction de leur "proximité", en terme de distance s'il s'agit d'agrèger deux singletons individus, ou en terme de critère d'agrégation s'il s'agit d'agrèger un singleton individu et un groupe d'individus déjà classés ensemble ou deux groupes d'individus. La distance utilisée ici est la distance euclidienne et le critère d'agrégation est le critère de Ward (augmentation de l'inertie intraclasse à chaque regroupement). On cherche à minimiser l'un ou l'autre de ces paramètres au fur et à mesure de l'avancement de la classification.

La classification hiérarchique ascendante permet d'obtenir un ensemble de partitions de moins en moins fines qui peuvent être schématiquement visualisées à l'aide d'un graphique en forme d'arbre : le dendrogramme (un exemple de dendrogramme est proposé figure 3.12).

Remarque : dans cette étude, cette méthode de classification est principalement utilisée pour déterminer une fourchette $[k_1 ; k_2]$ de nombres de classes à tester. En effet, au départ de la classification, le nombre de classes qu'aura la typologie finale n'est pas connu, même si son ordre de grandeur est pressenti a priori.

La seconde méthode de classification (méthode "kmeans") s'appuie sur un processus itératif qui permet d'affecter chaque individu dans la classe qui lui est la plus proche selon la distance retenue (ici la distance euclidienne).

Cette méthode nécessite de savoir à l'avance combien de classes doit avoir la partition finale, d'initialiser le processus avec des centres initiaux, de définir un nombre maximal souhaité d'itérations et une marge minimale acceptable de déplacement des centres de gravité lorsqu'ils sont calculés à nouveau à l'issue de chaque itération. Ce travail préliminaire réalisé, chaque individu est alors associé au centre initial le plus proche ; lorsque tous les individus sont traités, les centres de gravité des groupements ainsi constitués sont calculés et le processus est repris avec ces nouveaux centres. Il s'arrête si la convergence est atteinte (les centres de gravité ne bougent plus ou quasiment plus) ou quand le nombre d'itérations fixé est dépassé (même si la convergence n'a pas été atteinte).

Remarque : dans cette étude, 100 "kmeans" sont lancées par nombre de classes, testé entre k_1 et k_2 . Des critères (similarité et silhouette) permettant de synthétiser toute l'information ainsi obtenue sont calculés afin de déterminer le nombre de classes k_0 qui semble le plus pertinent. Les critères de similarité sont basés sur la notion de corrélation, ou la notion de distance euclidienne, entre les centres de gravité de deux partitions (avec le même nombre de classes) dont on veut tester la proximité. La procédure complète est décrite par Michelangeli et al. 1995 ("weather regimes : recurrence and quasi stationarity", Journal of the Atmospheric Sciences, vol 52, 1237-1256). La notion de silhouette est développée par Rousseeuw, 1987 ("Silhouettes : a graphical aid to interpretation and validation of cluster analysis" Journal of Computational and applied Mathematics 20 (1987) 53-65), elle repose sur le calcul et la comparaison, pour chaque individu, de la distance à sa propre classe et de celle à la classe voisine.

La méthode dite "des formes fortes" vient terminer la procédure. Elle consiste à identifier tous les événements tempêtes qui ont été classés ensemble dans plusieurs classifications "kmeans" à k_0 classes et ainsi de repérer des groupes relativement stables (constituant les formes fortes). Les événements tempêtes restants sont ensuite classés dans la forme forte la plus proche.

3.2. Différentes classifications testées

Plusieurs tests de classification ont été réalisés, avec des variables utilisées et/ou des prétraitements de celles-ci chaque fois différents.

Ces derniers sont de deux types :

- les variables (toutes quantitatives) sont simplement centrées et réduites. Elles ont le même poids et peuvent être plus ou moins corrélées entre elles ;
- une analyse factorielle multiple est réalisée (cette analyse permet de travailler avec des variables initiales de nature différente ou avec des variables regroupées par thème). Les variables résultantes finalement utilisées pour la classification sont non corrélées entre elles et n'ont pas le même poids.

En cas d'hésitation entre plusieurs partitions possibles (la procédure de classification exposée précédemment a donc pu être menée à son terme), celle qui semblera la plus pertinente d'un point de vue météorologique et la plus facilement utilisable ultérieurement sera conservée.

Le tableau suivant reprend de façon condensée les diverses explorations menées.

Un noyau de variables qui a été estimé minimal se retrouve dans tous les tests. Les variables concernées sont la pression minimale de l'événement pendant la date_critères de l'événement (PC_S), les latitudes et longitudes des points de départ et d'arrivée de la trajectoire (lat1, lat2, lon1 et lon2), le déplacement moyen, sous sa forme vectorielle (Umoy et Vmoy) ou sous la forme secteur/module (sect_depmoy et ff_depmoy).

Remarque : les variables de distance à l'estuaire de la Loire, de distance à Jersey et la longueur totale de la trajectoire ayant été ajoutées a posteriori des essais de classification réalisés dans le cadre de Vimers0, elles n'ont pas été testées et n'apparaissent donc pas dans le tableau suivant ; elles pourront être prises en compte dans d'éventuelles futures classifications dans le cadre de Vimers1. A ce stade, elles ont en revanche été utilisées pour décrire la classification retenue.

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

numéro essai	variables	prétraitement	k0 testé	nombre de classes final	commentaires
1.1	PC_S lat1 lon1 lat2 lon2 Umoy Vmoy	centrer réduire	3	4	statistiquement acceptable mais pas assez de précision d'un point de vue météorologique dans la suite préférer plus de classes quand c'est possible
1.2	PC_S lat1 lon1 lat2 lon2 Umoy Vmoy	centrer réduire	7	7	mêmes variables que 1.1 mais avec plus de classes (choix d'un autre k0 possible après 3)
Ajout de variables informatives sur l'impact sur la Bretagne					
2.1	PC_S Pzmin lat1 lon1 lat2 lon2 Umoy Vmoy ffS_max ffN_max ff_Pzmin	centrer réduire	9		k0 choisi dès le départ élevé (car sinon pas assez de précision d'après essai 1.1) MAIS pas de formes fortes stables trouvées
2.2	PC_S Pzmin lat1 lon1 lat2 lon2 Umoy Vmoy ffS_max ffN_max ff_Pzmin	centrer réduire	4	5 ou 6	mêmes variables que 2.1 mais avec seulement k0=4 (qui paraît le plus pertinent) résultats pas meilleurs que partitions avec centres initiaux aléatoires
3.1	PC_S dist_pte lat1 lon1 lat2 lon2 Umoy Vmoy ff_Pzmin ffS_max ffN_max	centrer réduire	3	3	critères ne permettent pas de choisir un k0 plus élevé nombre de classes final pas suffisant (si essai plus de formes fortes, au final 2 grosses classes, les autres très petites, et seulement 60 % des événements classés)
3.2	PC_S dist_km lat1 lon1 lat2 lon2 Umoy Vmoy ff_Pzmin ffS_max ffN_max	AFM 5groupes 7 axes	7	7	mêmes variables que 3.1 mais avec un autre prétraitement d'où travail sur des variables non corrélées choix 3 classes paraît mieux mais pas assez, k0=7 autre choix possible résultats très similaires à ceux du test 1.2 : la classification 1.2 étant plus facile d'emploi si de nouvelles dates sont à classer et utilisant des variables plus "parlantes", on préfère donc la 2.1 (avantage de ce test 3.2 : montre une certaine stabilité des 7 groupes obtenus avec 2.1)
variables quantitatives et qualitatives					
4	PC_S Pzmin lat1 lon1 lat2 lon2 sect_dep moy sect_Pzmin ff_dep moy ff_Pzmin ffS_max ffN_max	AFM 5 groupes 18 axes	9		pas de formes fortes décelables k0 = 4 aurait été mieux, mais alors 4 classes au final et pas assez de précision

Au final, la classification issue de l'essai "1.2" a été gardée. Les résultats obtenus sont très proches de ceux de l'essai "3.2". Les classifications résultantes se caractérisent toutes les deux par l'utilisation de 7 classes stables (élément fondamental en matière de classification), qui discriminent bien des populations type ayant un sens météorologique.

3.3. Description de la classification retenue

3.3.1. Phases de mise au point

Les différentes phases de la classification sont brièvement documentées ici.

Les variables utilisées correspondent au noyau dur que l'on s'est imposé, et uniquement ce noyau :

- latitude et longitude du point initial (**lat1, lon1**)
- latitude et longitude du point final (**lat2, lon2**)
- pression minimale du centre dépressionnaire associé à un événement tempétueux pendant la date_critères de cet événement (**PC_S**)
- déplacement moyen du centre dépressionnaire sur tout l'événement tempétueux, sous la forme vectorielle (**Umoy, Vmoy**)

Ces variables sont centrées et réduites au préalable.

La figure suivante présente le dendrogramme de la CAH à gauche et l'évolution du critère d'agrégation à droite.

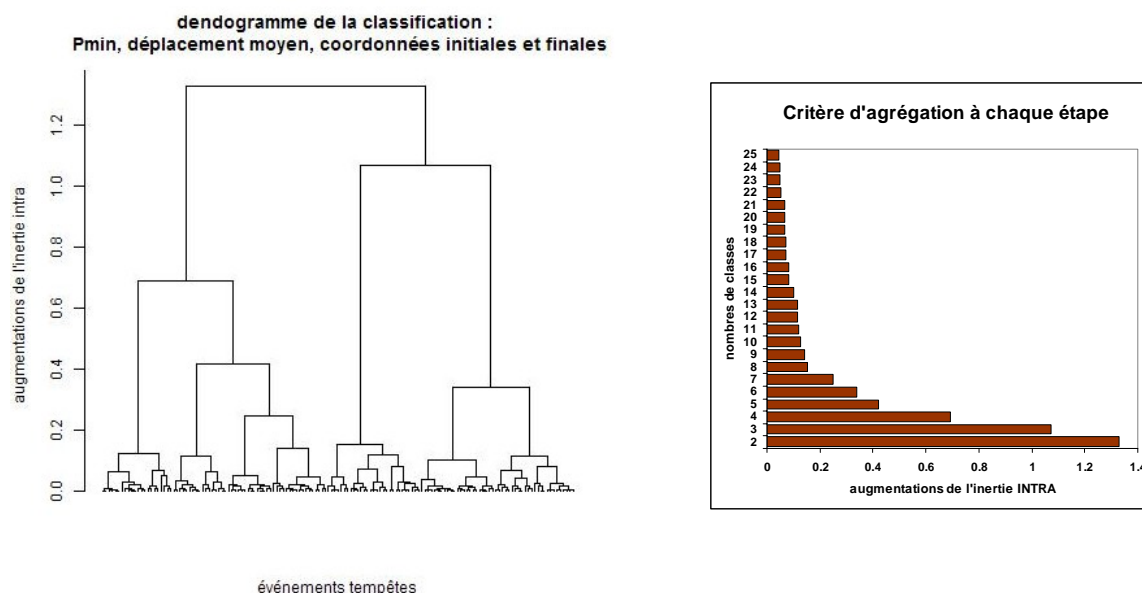


Figure 3.12 : graphiques se rapportant à la classification hiérarchique ascendante

L'étude de ces graphiques amène à tester une fourchette [2 ; 7] pour le nombre de classes k des classifications suivantes traitées avec la méthode "kmeans".

100 "kmeans" sont ainsi lancées à partir de k-uplets initiaux tirés aléatoirement parmi les 147 événements tempétueux, k variant entre 2 et 9 (fourchette un peu élargie).

Convention : dans la suite, lorsque le k-uplet initial est tiré aléatoirement, la partition résultante obtenue par la méthode "kmeans" est appelée "partition avec initialisation aléatoire".

La figure suivante reproduit l'évolution, en fonction du nombre de classes, du critère global de similarité basé sur le coefficient de corrélation et du critère global obtenu à partir des silhouettes. Ces deux critères doivent être les plus élevés possibles (ils sont tous les deux bornés à 1).

Remarque : pour k donné, un critère de similarité global et une silhouette globale sont calculés :

- ✓ un critère de similarité "partition" est calculé pour chacune des 100 "partitions avec initialisation aléatoire" (par rapport aux 99 autres "partitions avec initialisation aléatoire"), le critère de similarité global est la moyenne de ces 100 critères de similarité "partition" ;
- ✓ la silhouette de chacune des 100 "partitions avec initialisation aléatoire" est définie comme la moyenne des silhouettes de chacun des individus. La silhouette globale est la moyenne des 100 silhouettes ainsi calculées.

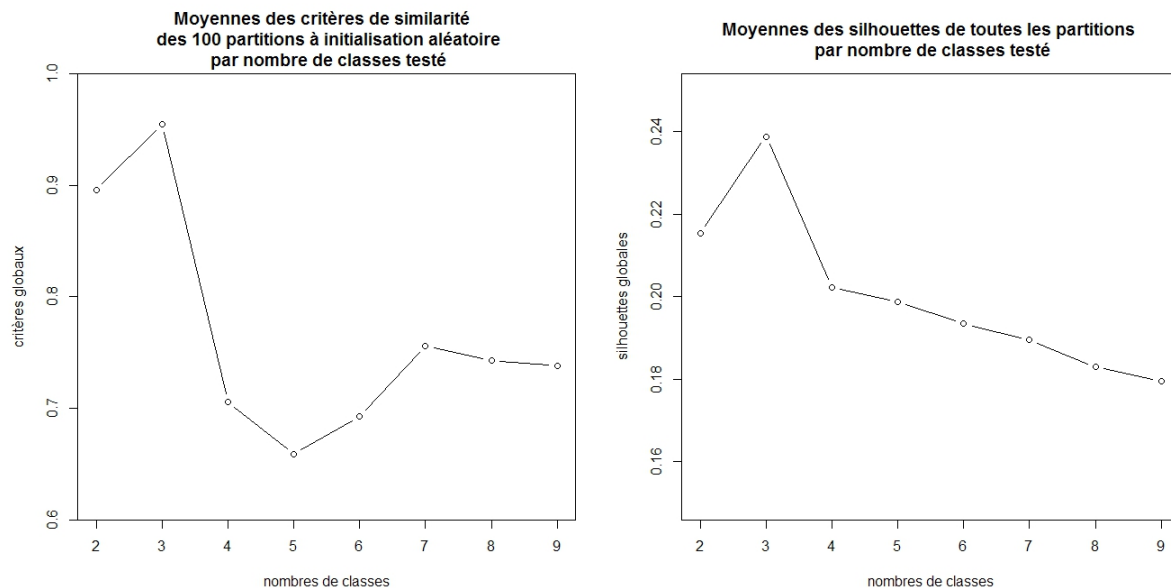


Figure 3.13 : graphiques se rapportant à la classification "kmeans"

Le choix de 3 classes semble s'imposer à la lecture des deux graphiques, mais un tel nombre de classes n'est pas suffisant pour identifier des groupes de tempêtes assez distincts les uns des autres ; c'est pourquoi un nombre de classes égal à 7 a également été testé en second choix. Ce choix est assez intuitif à partir du diagramme de gauche ; en revanche, il est beaucoup moins évident à partir de celui de droite. Il a en effet fallu revenir aux silhouettes des individus pour le confirmer : avec des partitions à 7 classes, les silhouettes de certains individus dépassent 0,5 (d'ailleurs, la valeur maximale de la silhouette d'un individu est atteinte pour ce nombre de classes) ; des individus ont aussi des silhouettes négatives, mais moins qu'avec 6, 8 ou 9 classes par exemple.

La méthode des formes fortes est appliquée à partir des 6 "partitions à initialisation aléatoire" à 7 classes qui obtiennent parmi les 10 meilleurs scores pour la silhouette et pour l'inertie interclasses.

85 % des événements tempétueux se trouvent ainsi classés, ils constituent 7 formes fortes. Les événements restants sont reclassés dans la forme forte la plus proche. A cette fin, une nouvelle "kmeans" est lancée avec comme centres initiaux les centres de gravité des formes fortes ; cela permet de vérifier que les événements qui ont permis de définir les formes fortes restent bien en place et donc, dans une certaine mesure, que ces regroupements sont stables.

3.3.2. Analyse des résultats

3.3.2.1. Analyse mathématique

La classification retenue est composée de 7 classes avec des effectifs assez homogènes (28, 20, 20, 21, 19, 23 et 16 événements tempétueux).

Parmi les 7 variables utilisées, ce sont la composante méridienne du déplacement moyen (Vmoy), la longitude de départ (lon1), la latitude d'arrivée (lat2) qui ont le plus contribué.

Cette partition explique 62 % de la variabilité totale de l'échantillon étudié. C'est mieux que les résultats obtenus en moyenne pour les 100 "partitions avec initialisation aléatoire" à 7 classes (en fait c'est au même niveau que la meilleure partition pour le critère d'inertie interclasses). C'est beaucoup mieux que les résultats obtenus pour 100 partitions créées artificiellement par tirage aléatoire de 7 classes de mêmes effectifs que la partition retenue.

Le nombre de silhouettes d'individus négatives a bien diminué par rapport aux résultats relevés en moyenne pour les 100 "partitions avec initialisation aléatoire" à 7 classes, tandis que le nombre de silhouettes d'individus supérieures à 0,3 a augmenté.

Les groupements semblent assez stables. En effet, le classement des 85 % événements déterminant les formes fortes n'est pas modifié par l'ajout des 15 % événements restants. En outre, un autre essai de classification, essai "3.2" dans le tableau du paragraphe 3.2, donne 7 classes à peu près semblables alors que les variables initiales sont différentes (en particulier les forces du vent observées sur la côte Sud et sur la côte Nord sont utilisées) et le prétraitement fait intervenir une analyse factorielle multiple. C'est d'ailleurs à cause de ce prétraitement que la classification basée sur quelques variables uniquement centrées et réduites a été préférée (en effet, cette classification sera plus simple à appliquer ultérieurement, par exemple pour classer une tempête ancienne).

Enfin, les classes semblent assez distinctes les unes des autres comme le montrent les deux figures suivantes où les individus, repérés par leur classe d'appartenance, sont projetés sur le premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales des 7 variables utilisées (plan d'inertie totale projetée maximale) d'une part et sur le plan factoriel engendré par les troisième et quatrième axes de cette même analyse d'autre part.

Projection des événements tempétueux sur le premier plan factoriel

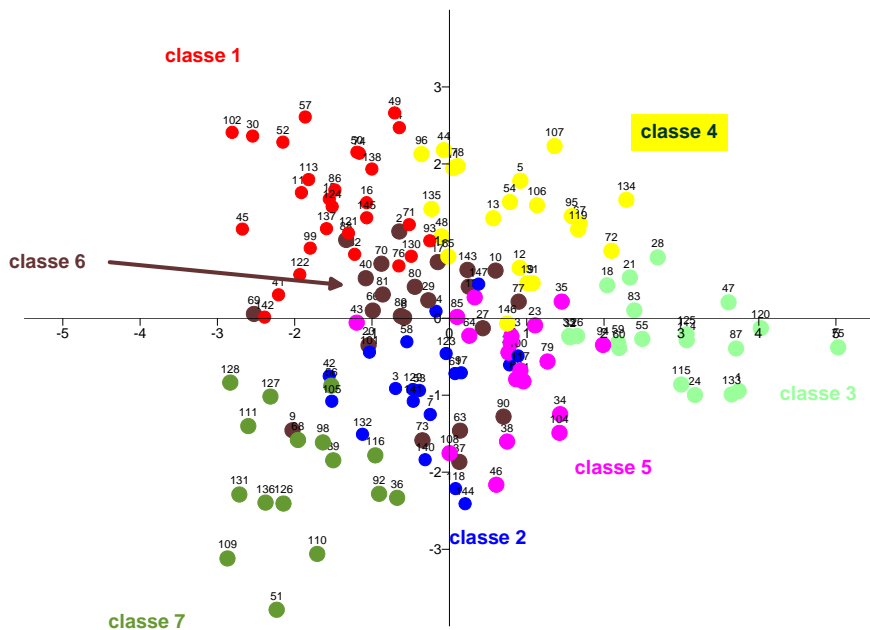


Figure 3.14 : projection des classes sur le premier plan factoriel de l'ACP

Les classes 1, 3, 4 et 7 sont bien séparées les unes des autres, d'une part, ainsi que du nuage plus regroupé que forment les 3 autres classes, d'autre part.

Projection des événements tempétueux sur le plan factoriel P3,4

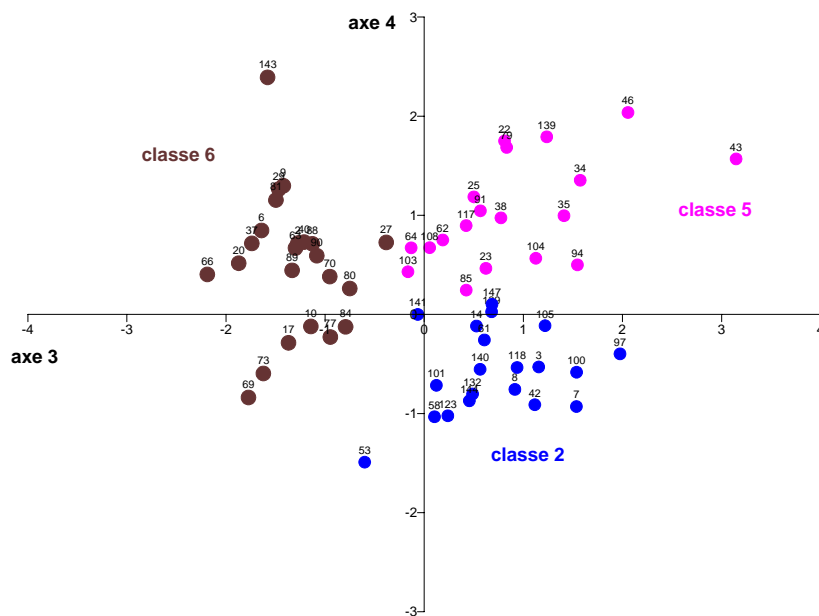


Figure 3.15 : projection des classes 2, 5 et 6 sur le plan factoriel P3,4 de l'ACP

Dans ce plan, les trois classes 2, 5 et 6 sont bien séparées les unes des autres.

3.3.2.2. Description des classes

Les 7 classes obtenues et leurs caractéristiques sont décrites ici de façon plus concrète, en termes géographiques et météorologiques. Ainsi, pour chaque classe, les trajectoires des événements tempêtes qui la constituent sont tracées sur une même carte, en superposition du nuage des 147 trajectoires rappelé figure 3.1. Ceci permet de découvrir visuellement la (ou les) spécificité(s) de chaque famille de tempêtes par rapport à l'ensemble des trajectoires.

Cet aperçu visuel est complété par une description plus affinée de chaque classe qui fait intervenir d'autres paramètres que les 7 ayant servi à réaliser la classification.

Remarque : à l'aide de tests statistiques, sont recherchés les paramètres qui caractérisent le mieux chacune des classes de la typologie, c'est-à-dire, pour une classe donnée :

- ✓ les paramètres quantitatifs dont la moyenne dans la classe est très différente de la moyenne calculée à partir de l'ensemble des 147 événements ;
- ✓ les paramètres qualitatifs dont la distribution dans la classe est très différente de la distribution obtenue à partir des 147 événements.

Les commentaires à propos d'une classe sont donc toujours à comprendre "par rapport à l'ensemble des 147 événements tempêtes" ; c'est pourquoi il est rappelé juste après les valeurs moyennes, respectivement les fréquences des modalités, des paramètres numériques, respectivement des paramètres qualitatifs, utilisés pour décrire les classes.

• Variables utilisées pour la classification

Variables	PC_S	Umoy	Vmoy	lat1	lon1	lat2	lon2
moyenne sur les 147 événements	974 hPa	45 km/h*	9 km/h*	50 °N	22 °O	54 °N	6 °E

*déplacement moyen : 260 ° 46 km/h

• Autres paramètres

Variables	PC_tot	Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax
moyenne sur les 147 événements	972 hPa	988 hPa	57 km/h	92 km/h

Variables	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	lon_traj	duree
moyenne sur les 147 événements	542 km	648 km	503 km	2 447 km	46 h

Critères	Dates avec critère en ligne	Dates pas critère en ligne
Vent_côteN	33 %	67 %
Vent_côteS	19 %	81 %
Pression_côteS	23 %	77 %
Vent_pointe_Bretagne	73 %	27 %

Forces Beaufort du vent	<	≥
Côte Sud_seuil 10 B	32 %	68 %
Côte Nord_seuil 10 B	61 %	39 %
Une des deux côtes*_seuil 11 B	67 %	33 %

*Le maximum de la force en Beaufort des vents sur la côte Nord et sur la côte Sud est noté max_ff_SN dans les tableaux suivants, décrivant chacune des classes.

• Description de la classe 1

Trajectoires de la classe n°1

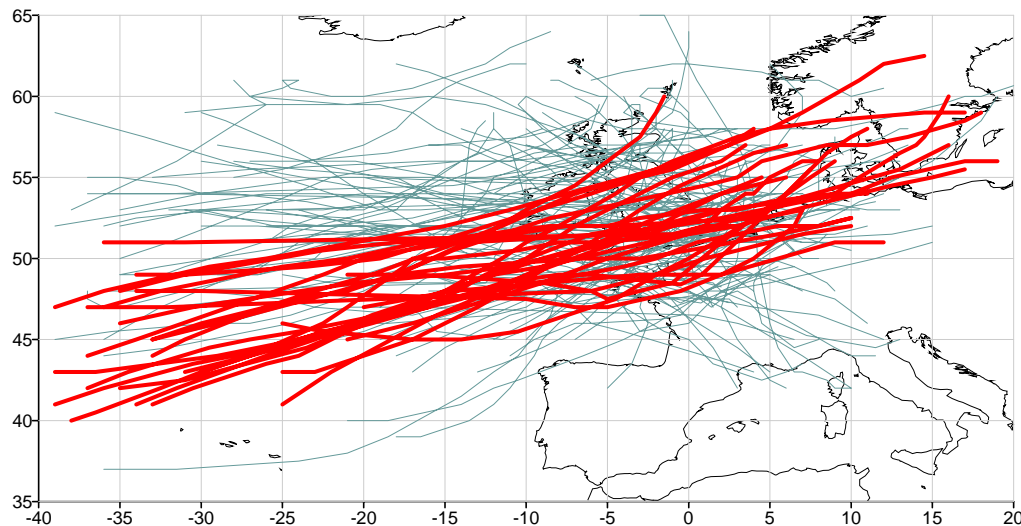


Figure 3.16.1 : trajectoires de la classe 1 (28 événements, soit 19 %)

Visuellement, les trajectoires de cette classe sont axées OSO/ENE. Elles sont très longues, débutent très à l'Ouest et très au Sud et se terminent bien à l'Est. Elles passent assez près de la région.

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 1	O SO pas NO	très rapide	pointe élevée	très longue		proche		proche	décembre et janvier

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	Critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 1			non	oui					≥ 11 B

• Description de la classe 2

Trajectoires de la classe n°2

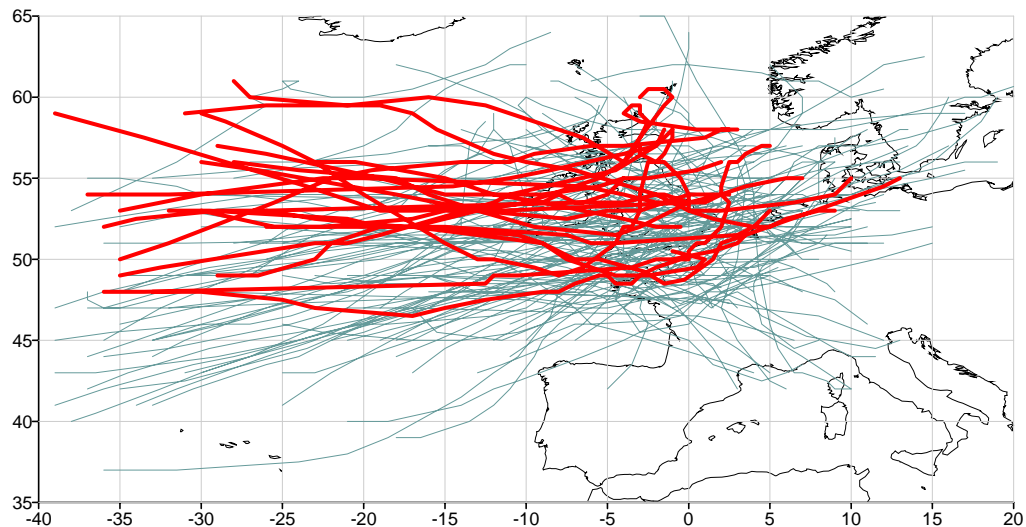


Figure 3.16.2 : trajectoires de la classe 2 (20 événements, soit 14 %)

Visuellement, les trajectoires de cette classe débutent très à l'Ouest et assez Nord.

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 2		assez lent			très longue				

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 2	creuse	assez basse			non	oui	≥ 10 B		

• Description de la classe 3

Trajectoires de la classe n°3

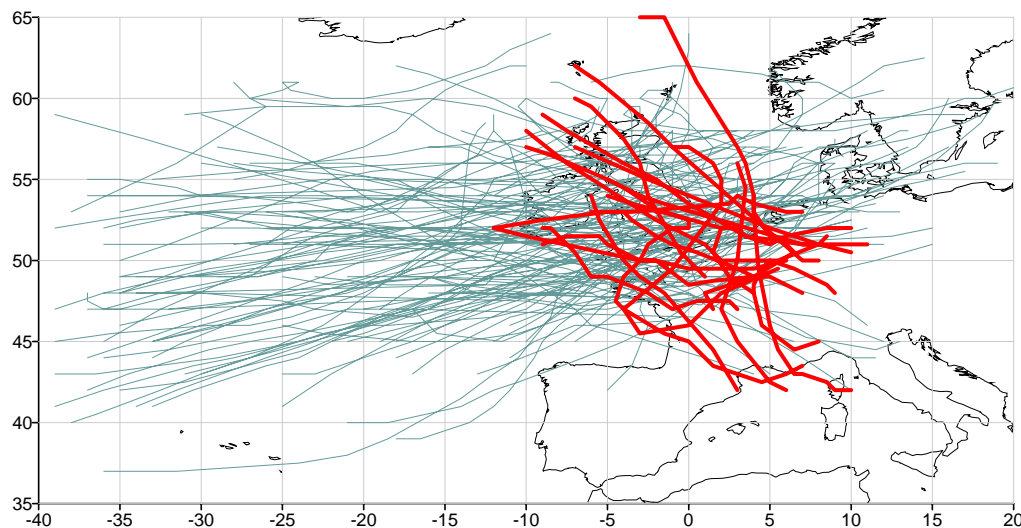


Figure 3.16.3 : trajectoires de la classe 3 (20 événements, soit 14 %)

Visuellement, cette classe regroupe des événements tempétueux dont les trajectoires présentent une orientation N/S très marquée (voire NE/SO) : celles-ci débutent beaucoup moins Ouest que les autres trajectoires en moyenne mais très Nord et se terminent très Sud ; elles sont très courtes en longueur.

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 3	N NO pas SO	assez lent		très courte	courte				février à novembre

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 3	pas creuse du tout	pas basse du tout	oui	non					< 11 B

• Description de la classe 4

Trajectoires de la classe n°4

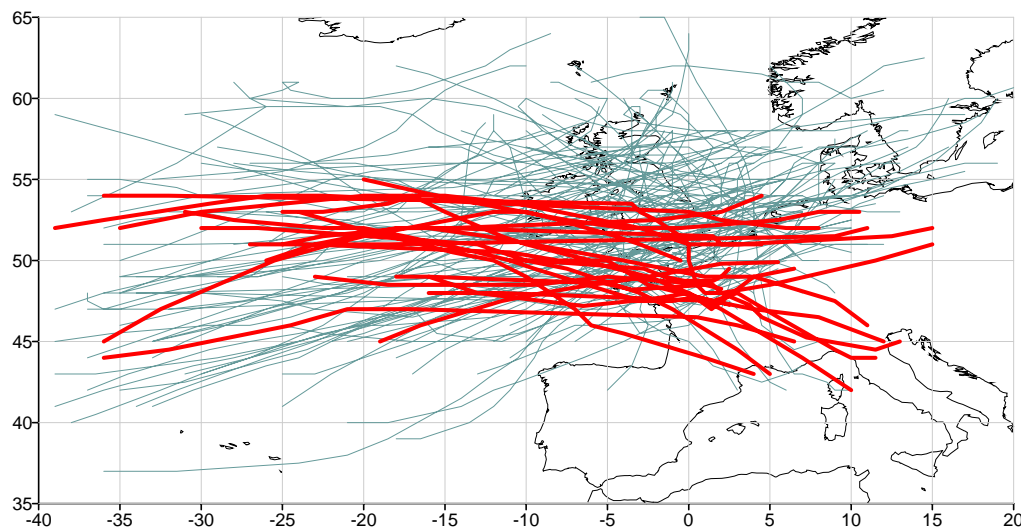


Figure 3.16.4 : trajectoires de la classe 4 (21 événements, soit 14 %)

Visuellement, les trajectoires de cette classe se terminent elles aussi très Sud, comme la classe 3, et certaines assez Est ; elles sont orientées ONO/ESE et passent près de la région.

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 4	O NO pas SO	rapide				proche	très proche	très proche	

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 4	pas creuse du tout				plutôt oui				

• Description de la classe 5

Trajectoires de la classe n°5

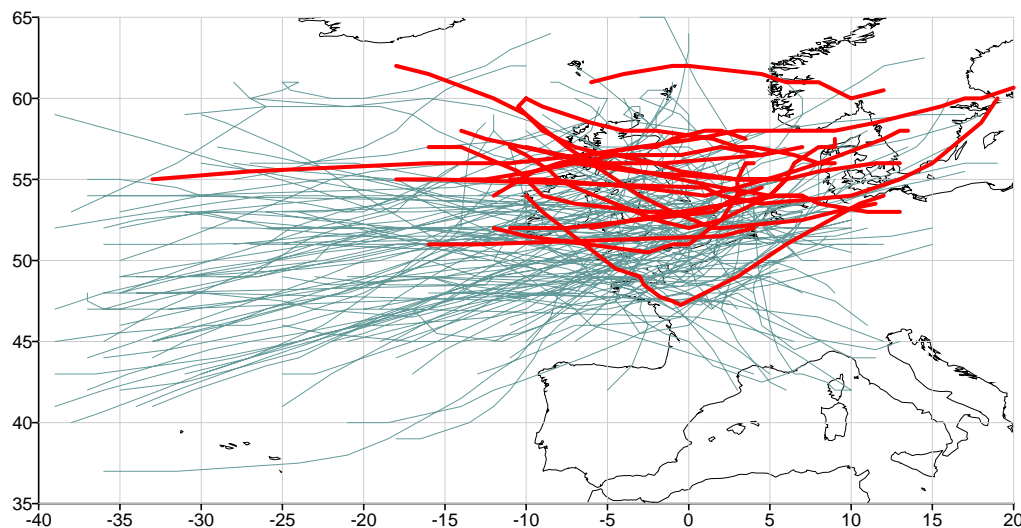


Figure 3.16.5 : trajectoires de la classe 5 (19 événements, soit 13 %)

Visuellement, les trajectoires débutent un peu moins Ouest que la moyenne mais très au Nord et se terminent très à l'Est, elles sont finalement plutôt courtes en longueur. Dans l'ensemble, ces événements tempétueux circulent très loin de la région.

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 5	O pas SO	assez lent	pas de pointe	très courte		très loin	très loin	très loin	

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 5	creuse		oui	non					

• Description de la classe 6

Trajectoires de la classe n°6

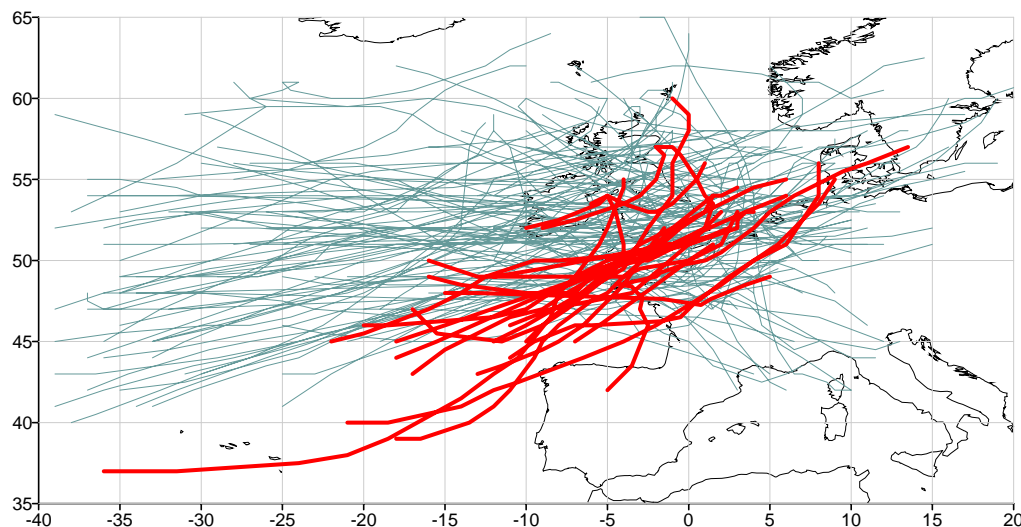


Figure 3.16.6 : trajectoires de la classe 6 (23 événements, soit 16 %)

Visuellement, les trajectoires débutent un peu moins Ouest que la moyenne mais très au Sud et certaines se terminent à peine à l'Est, d'où une composante Sud du déplacement marquée ; elles sont plutôt courtes en longueur. Dans l'ensemble, ces événements tempétueux circulent très près de la région.

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 6	SO pas NO		pas de pointe	très courte		très proche	très proche	proche	

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 6		basse	non		oui	non	< 10 B	< 10 B	

• Description de la classe 7

Trajectoires de la classe n°7

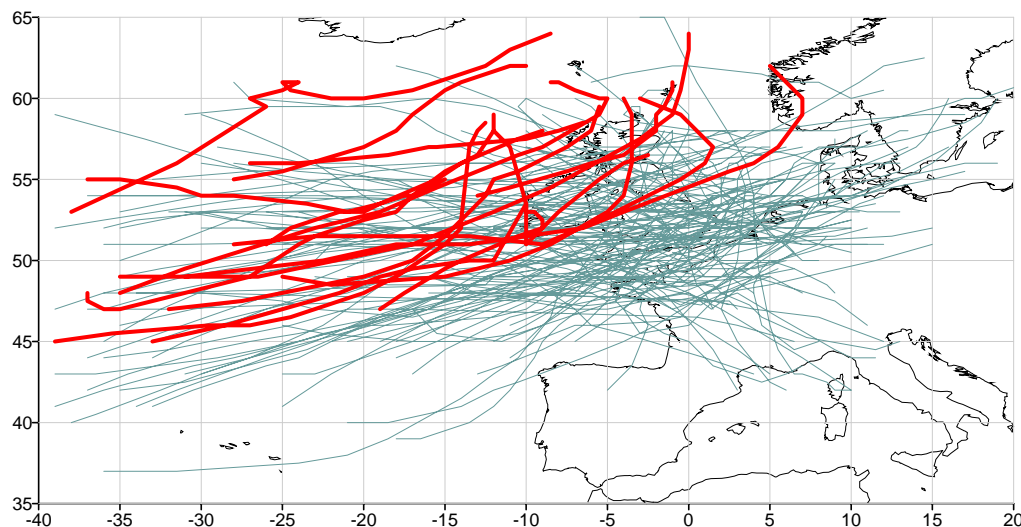


Figure 3.16.7 : trajectoires de la classe7 (16 événements, soit 11 %)

Visuellement, les trajectoires se terminent très au Nord et sur le proche Ouest (donc beaucoup moins Est que la moyenne). Le point de départ est quant à lui assez Ouest, le déplacement accuse une composante Sud assez marquée ; les centres dépressionnaires de ces événements tempétueux passent loin de la Bretagne

Paramètres géographiques	sect_Pzmin	ff_Pzmin	ff_depmax	long_traj	duree	dist_pte	dist_estuai	dist_jers	saison
Classe 7	S SO pas O ni NO					très loin	très loin	très loin	

Paramètres météorologiques	PC_tot	Pzmin	critère ventN	critère ventS	critère Psud	critère vent pointe	ffS_max	ffN_max	max_ff_SN
Classe 7	très creuse		non	plutôt oui	non				≥ 11 B

Cette classification permet d'obtenir une gamme d'événements tempétueux tout à fait conforme à ce à quoi l'on pouvait s'attendre a priori : des événements se déplaçant rapidement ou non, plein Ouest ou plutôt à composante Nord ou à composante Sud, frôlant la région ou restant très au large, durant plus ou moins longtemps...

Chaque classe a sa spécificité, ainsi :

- classe 1 : événements les plus rapides, trajectoires les plus longues, deuxième après classe 7 avec le plus de vents de plus de 11 B sur l'une au moins des deux côtes Nord ou Sud
- classe 2 : événements avec les pressions les plus creuses (centre d'action mais **aussi** Bretagne), les plus longs en durée (car déplacements pas très rapides)
- classe 3 : trajectoires Nord/Sud, les plus courtes en longueur et en durée, avec les pressions les moins basses (centre et région). Le moins de vents de plus de 11 B ni sur côte N ni sur côte S. C'est dans cette classe que l'on trouve une partie des dates avec plus de 1005 hPa sur la Bretagne qui correspondent schématiquement à des situations où la région est située entre des hautes pressions à l'Ouest et des basses pressions à l'Est (dans ces cas-là d'ailleurs, ce sont plutôt les premières qui gouvernent l'intensité des vents)
- classe 4 : déplacements à composante Nord (moins que classe 3, mais ce sont les deux seules des 7 classes avec une telle composante), déplacements rapides par rapport aux autres (moins que ceux de la classe 1 cependant), forte proportion d'événements proches de la région (en particulier de l'estuaire de la Loire et de Jersey)
- classe 5 : le plus de trajectoires loin de la Bretagne (2^{ème} position après la classe 7) et déplacements lents en pointe et en moyenne. Dans cette classe, on trouve l'autre partie des événements avec plus de 1005 hPa sur la Bretagne qui correspondent à une dépression creuse sur la mer de Norvège (ou aux environs) associée à l'arrière à une forte hausse de pressions
- classe 6 : trajectoires avec composante Sud prononcée, forte proportion de trajectoires proches de la région (en particulier de la pointe de Crozon), pressions les plus basses sur la zone et pourtant le plus de vents de moins de 10 B en **proportion** sur la côte Sud et sur la côte Nord (cela n'exclut pas que, pour certaines tempêtes de cette classe, il a été observé 11 B et plus, sur la côte SUD, par exemple : 12 B le 15/10/1987, 11 B les 03/02/1990, 06/07/1969 et 24/01/1984)
- classe 7 : trajectoires composante Sud également, pressions du centre d'action les plus creuses, mais comme proportion importante de trajectoires les plus loin de la Bretagne, pas de pressions basses sur la Bretagne (comme c'est le cas en classe 2). Le plus de vents de plus de 11 B sur l'une au moins des deux côtes Nord ou Sud.

Les figurines suivantes illustrent le lien entre l'appartenance à une classe (en l'occurrence 1, 3 et 7) et l'observation d'au moins un vent de plus de 11 B sur la côte Nord ou sur la côte Sud.

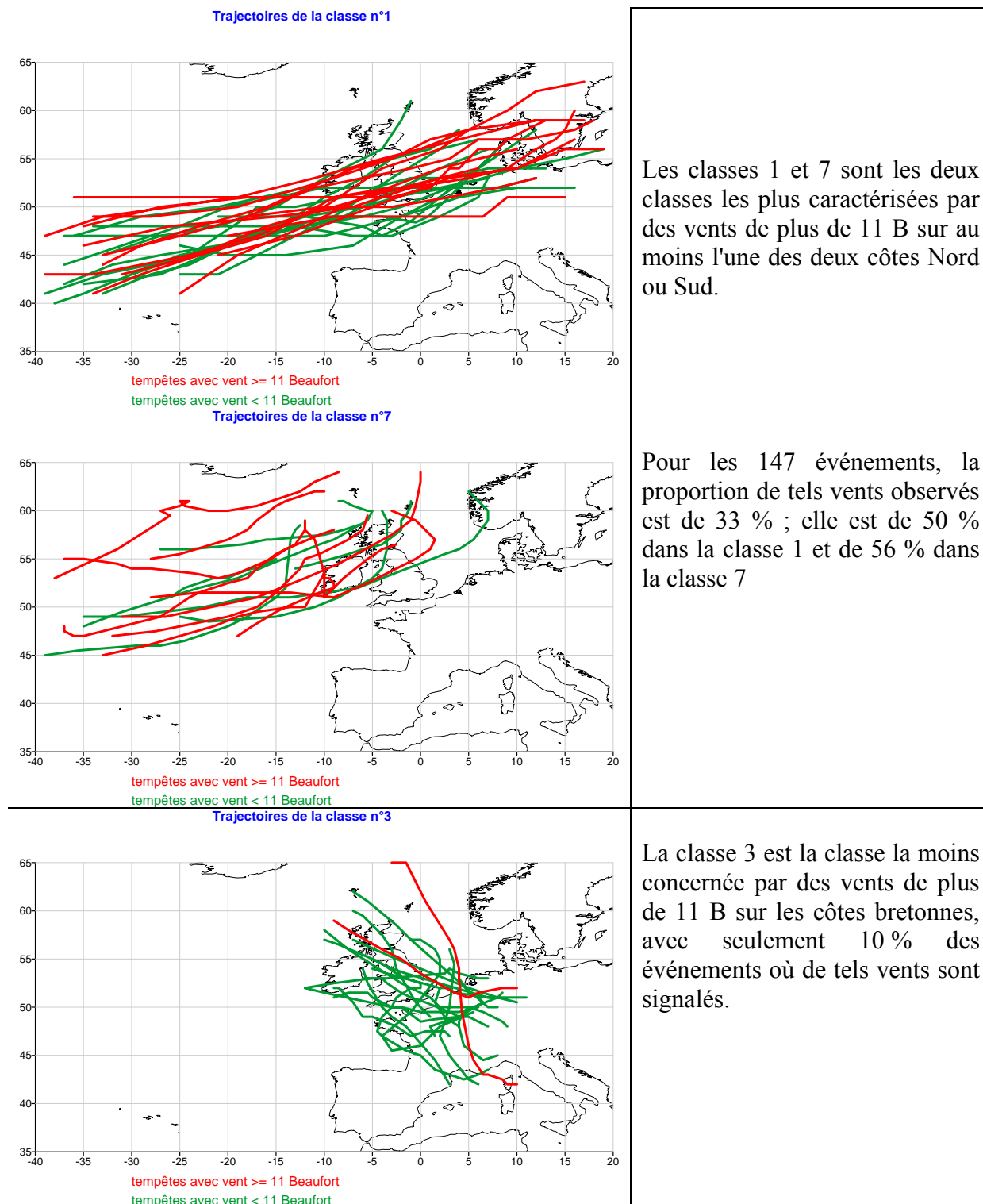


Figure 3.17 : distinction des trajectoires des événements avec des forces maximales de plus de 11 B sur l'une au moins des deux côtes Nord et Sud pour les classes 1, 7 et 3

Ci-dessous, les couleurs des trajectoires des classes 2 d'une part et 6 d'autre part dépendent de l'existence (en rouge) ou non (en vert) d'un vent de plus de 10 B sur la côte Sud. En effet, ce sont les deux classes les plus caractérisées par cette existence ou non.

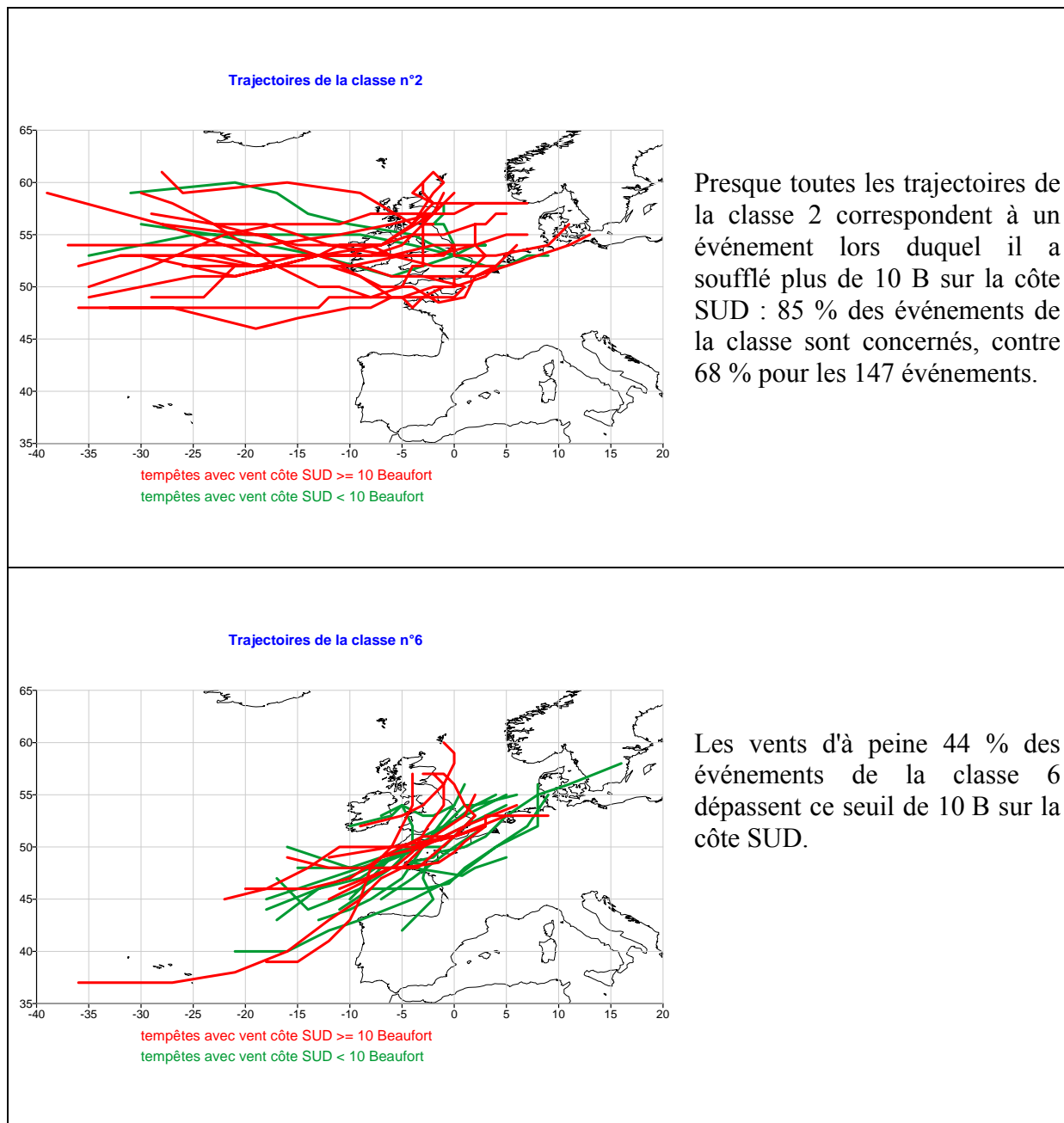


Figure 3.18 : distinction des trajectoires des événements avec des forces maximales de vent sur la côte Sud de plus de 10 B pour les classes 2 et 6

Enfin, l'ensemble des figures 3.19 illustre le fait que les classes 2 et 7 sont caractérisées par des pressions très basses du centre dépressionnaire de chaque événement pris dans sa totalité, alors que c'est le contraire pour les classes 3 et 4. Le seuil de 970 hPa est retenu car il est voisin de la moyenne calculée pour les 147 événements.

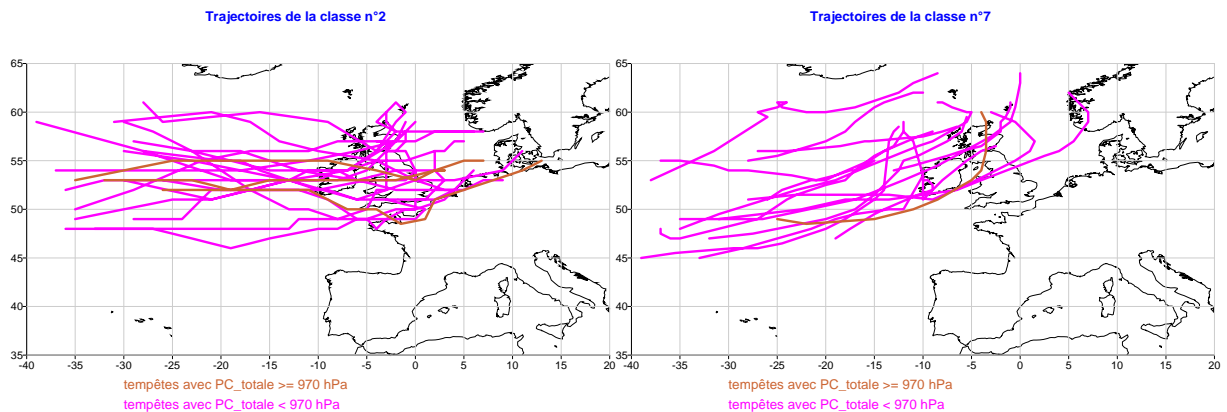


Figure 3.19.1 : distinction des trajectoires des événements en fonction de la valeur minimale de leurs centres dépressionnaires associés pour les classes 2 et 7

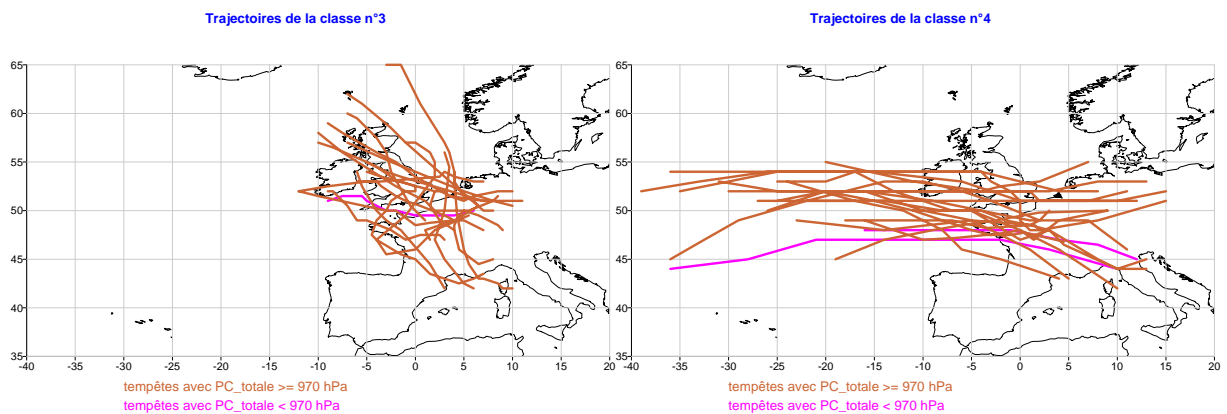


Figure 3.19.2 : distinction des trajectoires des événements en fonction de la valeur minimale de leurs centres dépressionnaires pour les classes 3 et 4

3.3.2.3. Classement de certains événements

- **Événements les mieux classés en termes de silhouettes**

Classes	Événement avec la meilleure silhouette (numéro de l'événement)	Commentaires éventuels
1	08/02/1990 (113)	un peu loin de la région
2	07/12/1992 (123)	pressions du centre dépressionnaire un peu élevées
3	24/03/1992 (47)	-
4	05/12/1988 (107)	-
5	13/02/2005 (79)	exemple où PC_tot = 968 hPa et Pzmin=1011 hPa
6	26/02/2010 (89)	également événement le plus près du centre de gravité de la classe
7	03/01/1998 (136)	également événement le plus près du centre de gravité de la classe

- **Événements les moins bien classés en termes de silhouettes**

Classes	Événement avec la meilleure silhouette (numéro de l'événement)	Commentaires éventuels
1	16/12/2011 (93)	silhouette négative
2	23/04/2012 (147)	également événement le plus éloigné du centre de gravité de la classe
3	11/04/1985 (32)	
4	27/05/2007 (146)	silhouette négative
5	26/02/1990 (43)	également événement le plus éloigné du centre de gravité de la classe
6	23/01/1984 (27)	silhouette négative
7	13/12/2011 (92)	silhouette négative

Remarque sur l'événement du 16/12/2011 : a priori pas exceptionnel, d'autant plus qu'il est plutôt mal classé (point initial pas assez Ouest et Sud, d'où une trajectoire un peu courte et en outre des vents pas assez forts pour la classe), cet événement est pourtant intéressant et sera retenu dans la suite du projet VIMERS1 car les simulations PEARP actuellement disponibles possèdent quelques "runs" décrivant des tempêtes extrêmes plausibles.

Remarque : à signaler également l'événement du 26/01/2001 (n° 71) rattaché à la classe 1 par la méthode "k-means" (classe dont le centre de gravité est le plus proche) mais dont la silhouette est faiblement négative. Une silhouette négative indique que l'individu est "mal classé" et qu'en moyenne il est plus proche de tous les éléments d'une autre classe voisine que le calcul de la silhouette permet de connaître. Ainsi, les événements signalés ici avec une silhouette négative pourraient être associés à :

- ✓ la classe 4 pour le 16/12/2011
- ✓ la classe 2 pour le 27/05/2007
- ✓ la classe 5 pour le 23/01/1983
- ✓ la classe 2 pour le 13/12/2011
- ✓ la classe 4 pour le 26/01/2001

• **Événements avec paramètres météorologiques et/ou géographiques remarquables**

Classes	Date (numéro)	Paramètre remarquable	Commentaires éventuels
1	23/11/1984 (30)	rapidité déplacement	10 et 11 B sur côtes
2	06/11/2000 (141)	durée plus longue	un peu près région pour la classe mais Pzmin basse (6 ^{ème} rang)
3	20/02/1996 (133)	déplacement N/S	maxi de Pzmin (1012,1 hPa)
4	13/02/1972 (12)	12 B sur les deux côtes	P un peu plus basses que les moyennes de la classe
	07/02/1996 (95)	12 et 11 B sur les côtes	P beaucoup plus creuses que les moyennes de la classe
5	26/02/1989 (38)	10 B Nord, 8 B Sud	Pzmin basse (3 ^{ème} rang)
	25/05/1989 (108)	Pzmin minimale (953,6 hPa)	lat1 pas assez Sud, lon2 pas assez Est, trop près région la classe 2 aurait aussi convenu (Cf. silhouette) mais alors lon1 pas assez Ouest
	20/12/1991 (46)	Pzmin une des plus élevée et PC_tot une ds plus faible	10 B sur les deux côtes
6	28/02/2010 (6)	courte durée	parmi plus proches de Jersey 9 B Sud, 7 B Nord
7	10/01/1993 (51)	PC_tot minmale (920 hPa)	10 et 11 B sur les côtes

• Evénements marquants de triste mémoire

Tempête (numéro)	Classe	Commentaires éventuels
06/07/1969 (10)	6	classement mauvais (composante S/N pas marquée, du fait d'une lat1 trop Nord, pressions pas assez creuses). De plus vents 11 B sur les deux côtes
15/10/1987 (9)	6	bien classée en termes de tracé de la trajectoire, mais événement TRES creux, et donnant trop de vent pour la classe 6
03/02/1990 (2)	6	bien classée en termes de tracé de la trajectoire, mais événement pas assez creux, circulant trop vite et donnant trop de vent pour la classe 6
26/12/1999 (4) <i>Lothar</i>	1	bien classée, peut-être lon1 pas assez Ouest et donc long_traj un peu inférieure à celles de la classe
27/12/1999 (5) <i>Martin</i>	4	bien classée en termes de tracé de la trajectoire, mais événement un peu creux et trop rapide pour la classe
09/12/2007 (8)	2	bien classée, cependant durée un peu courte (a généré des vagues importantes, records d'après NOAA)
10/03/2008 (7) <i>Johanna</i>	2	bien classée, mais déplacement un peu rapide et donc une durée trop courte pour cette classe
23/01/2009 (85) <i>Klaus</i>	5	bien classée, sinon que déplacement un peu près de la région
09/05/2009 (86) <i>Quinten</i>	1	bien classée ; seulement pas très rapide et 9 et 10 B
28/02/2010 (6) <i>Xynthia</i>	6	bien classée (sinon un peu rapide), une des trajectoires les plus courtes, un des événements passant très proche de Jersey

3.4. Conclusion de la typologie

Au final, la classification des 147 événements tempétueux retenue donne des résultats qui nous paraissent à la fois stables et réalistes. Les 7 classes obtenues sont assez discriminantes, ont une dispersion raisonnable et offrent un éventail de trajectoires et d'intensité des phénomènes assez intéressant. L'échantillon est loin d'être exhaustif, mais il est représentatif des phénomènes météorologiques qui ont été susceptibles de générer des aléas littoraux majeurs sur la région (aléas avérés ou non d'ailleurs, si les circonstances étaient "favorables" : par exemple trajectoire favorable ayant épargné les lieux vulnérables, ou encore, concomitance avec une basse mer,..).

L'étape suivante consistera à extraire les éléments étalons et extrêmes de chaque classe pour essayer de les analyser plus finement en termes d'impacts. C'est le cœur même du projet Vimers 1 sur 2013/2014.

Cette typologie permettra également de tenter d'identifier des analogues pour les tempêtes anciennes étudiées parallèlement ou pour des événements considérés comme intéressants par les partenaires mais qui n'apparaissent pas dans la liste des 147 événements sélectionnés.