



**Direction
Interrégionale
Ouest**

BP 49139
35091 RENNES Cedex 9

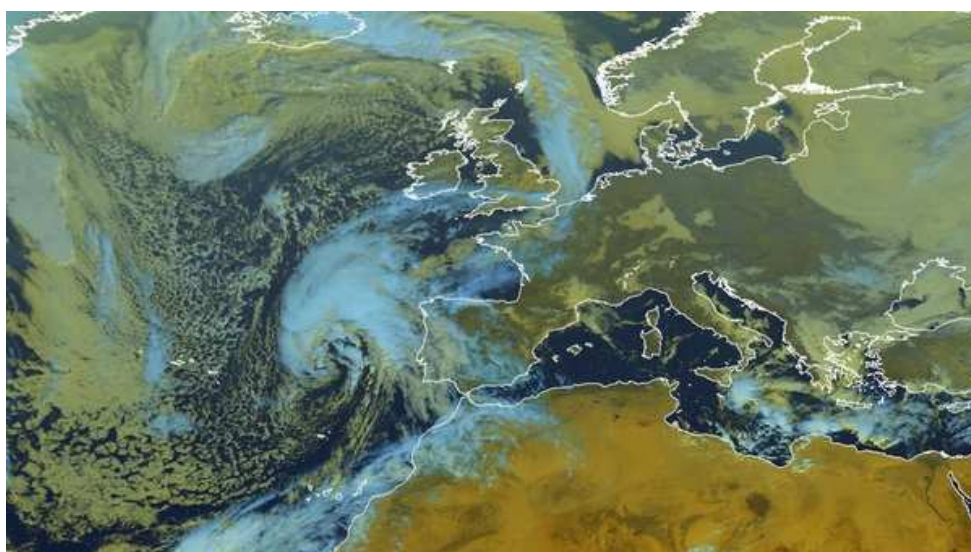
en partenariat avec



Etude des tempêtes menaçant le littoral breton

VIMERS 1

Rapport synthétique



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

***Etude réalisée
dans le cadre du projet
VIMERS-1***

octobre 2014



Le projet VIMERS-1 résulte d'un partenariat scientifique entre **Météo-France**, le **CETMEF** (Centre d'Etudes Techniques, Maritimes Et Fluviales) à l'origine*, **EDF(R&D)** et le **SHOM** (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine).

Le financement du projet est assuré en partie par les fonds propres de chacun des partenaires scientifiques, par la **DREAL de Bretagne** (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Bretagne) et la **Région Bretagne**.

* en cours de projet, le 1^{er} janvier 2014, le **CEREMA** (Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) a été créé. Il est constitué par la réunion de onze services alors existants, parmi lesquels le CETMEF. Dans ce rapport, il sera donc fait mention uniquement du CEREMA.



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

1. RAPPELS DES OBJECTIFS VIMERS	1
1.1. PRINCIPALES CONCLUSIONS DE VIMERS-0	1
1.2. RAPPEL DES OBJECTIFS VIMERS-1	2
2. ENRICHISSEMENT DE LA BASE DE TEMPETES VIMERS-0	3
2.1. TEMPETES ANCIENNES SUPPLEMENTAIRES ANALYSEES	3
2.2.1. <i>Quelques exemples</i>	5
2.1. RAJOUT DES EVENEMENTS RECENTS (HIVER 2013/2014).....	7
2.3. RECHERCHE D'UNE TEMPETE ANALOGUE	8
3. REJEU DE 25 SITUATIONS DATES DE REFERENCE	9
3.1. RAPPEL DE LA METHODE DE SELECTION DES SITUATIONS DE REFERENCE.....	9
3.2. METHODOLOGIE DE DESCENTE D'ECHELLE	11
3.3. VALIDATION ET MISE A DISPOSITION DES DONNEES DE FORÇAGE	11
3.4. ENRICHISSEMENT DU CONTENU DES FICHES TEMPETES DES EVENEMENTS DE REFERENCE.....	13
4. EVALUATION DES VAGUES ASSOCIEES A CES EVENEMENTS SURVENUS	15
4.1. LIMITES DE L'EXERCICE	15
4.2. METHODE DE SIMULATION DES VAGUES ET DE VALIDATION	16
4.3. QUELQUES RESULTATS	16
5. SURCOTES ET NIVEAUX MARINS POTENTIELS DE CERTAINS EVENEMENTS METEOROLOGIQUES REELS	18
5.1. PRINCIPE DES SIMULATIONS	19
5.2. METHODOLOGIE POUR LA PRISE EN COMPTE D'UNE MAREE FICTIVE.....	19
5.3. RESULTATS ET VALIDATION DES SIMULATIONS DE SURCOTES ET DES NIVEAUX MARINS	22
5.4. COMPARAISON AVEC DONNEES DE NIVEAUX MARINS EXTREMES SHOM	25
5.5. CONCLUSIONS DE L'EXPERIMENTATION.....	26
6. ANALYSE DE L'IMPACT D'EVENEMENTS EXTREMES NON SURVENUS	27
6.1. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE PEARP	27
6.2. METHODE DE SELECTION DE TROIS "RUNS" EXTREMES.....	27
6.3. ANALYSE DES RESULTATS	28
6.4. INTERPRETATION DE CES RESULTATS	31
7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	32
 RAPPORTS TECHNIQUES COMPLEMENTAIRES	 34
GLOSSAIRE	35

1. RAPPELS DES OBJECTIFS VIMERS

1.1. Principales conclusions de VIMERS-0

Le projet VIMERS-0 s'est déroulé en 2012/2013. Il avait pour objectif principal de constituer une base de données tempêtes à partir des observations de sémaphores, mais également de toute pièce d'archive susceptible d'apporter une information pertinente sur l'événement.

La recherche d'événements, réalisée en 2012, s'est focalisée dans un premier temps sur la période 1950/2012, très bien renseignée dans les archives numériques de Météo-France. Des critères purement mathématiques (sur le vent, la pression, le nombre de sémaphores concernés) ont permis de définir clairement ce qui serait considéré comme un événement tempête dans le contexte du projet VIMERS. Ils ont également permis de sélectionner de façon quasi automatique, à partir des bases de données de Météo-France, les épisodes de tempêtes ayant touché la région Bretagne élargie depuis 1950. En particulier, environ 150 tempêtes ont ainsi été identifiées sur la période 1979/2012 : 1979 est en effet l'année où débutent les ré-analyses ERA INTERIM du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme CEPTM, (ECMWF en anglais). Ces ré-analyses sont très utiles pour décrire le contexte météorologique des événements tempétueux, elles sont essentielles pour obtenir les forçages atmosphériques (par descente d'échelle, voir ci-après le paragraphe 3.2) qui sont fournis en entrée des modèles de vagues et de surcotes (l'un des objectifs du projet VIMERS-1). Cinq tempêtes légèrement antérieures ont été ajoutées, car considérées comme particulièrement intéressantes.

Chaque tempête retenue entre 1979 et 2012, ainsi que les cinq tempêtes légèrement antérieures, a fait l'objet d'une fiche descriptive très détaillée décrivant essentiellement le déplacement de la tempête, les conditions météorologiques associées, les dégâts recensés. L'ensemble a été synthétisé sous la forme d'une base de données homogène des trajectoires et intensités. A partir de cette dernière, une typologie des tempêtes fondée uniquement sur des critères météorologiques a pu être mise au point : sept classes distinctes de tempêtes ont été définies et validées.

A l'issue de tout ce travail d'analyse sur la période 1979/2012 (plus les cinq événements légèrement antérieurs), 27 tempêtes de référence représentatives de la variabilité des tempêtes bretonnes, ont été sélectionnées (Cf. tableau du §3.1).

En parallèle, un travail de recherche et de documentation d'événements tempétueux plus anciens (antérieurs à 1949), pour lesquels très peu d'observations ont été numérisées, a été réalisé. Ces événements sont venus compléter la base de tempêtes 1979/2012.

Le projet VIMERS-0 a fait l'objet d'un rapport final.

1.2. Rappel des objectifs VIMERS-1

Le projet VIMERS-1 s'est déroulé entre 2013 et 2014.

Les objectifs du projet VIMERS-1 ont été définis bien en amont, au moment du montage du projet global VIMERS (en 2011). En conséquence, certains ont dû être redéfinis au fur et à mesure de la progression du projet.

Les trois objectifs initiaux de VIMERS-1 décrits dans la convention sont rappelés ci-après, textuellement :

- intensifier la recherche croisée d'information dormant dans les archives ;
- documenter la base de données VIMERS ;
- imaginer des tempêtes virtuelles extrêmes mais plausibles.

Les réunions de suivi technique et les comités de pilotage réguliers pendant la phase du projet (au rythme de trois par an environ) ont permis de recalibrer certains de ces objectifs avec l'ensemble des partenaires, en fonction des avancées techniques obtenues. Tous les choix effectués sont explicités et justifiés dans les comptes rendus officiels des comités scientifiques et techniques et dans ceux des comités de pilotage. Ils ont été validés par l'ensemble des partenaires.

Les chapitres suivants synthétisent les résultats obtenus. On constatera que même si la terminologie est différente, les trois objectifs principaux initiaux ont été traités.

Il est rappelé que l'ensemble des travaux effectués a fait l'objet de rapports techniques détaillés, listés à la fin de ce document.

2. ENRICHISSEMENT DE LA BASE DE TEMPÊTES VIMERS-0

A l'issue du projet VIMERS-0, la base de tempêtes VIMERS constituée était déjà consistante. Cependant, le travail de recherche et de documentation d'événements anciens n'était pas achevé et la base ne contenait presque exclusivement que des informations météorologiques. L'étude des événements anciens s'est donc poursuivie au cours du projet VIMERS-1 et la base a ainsi pu être enrichie.

En outre, l'hiver 2013/2014 ayant connu de nombreux épisodes tempétueux qui ont balayé la région Bretagne élargie, ces nouveaux événements ont également été intégrés à chaud dans la base VIMERS ; celle-ci a d'ailleurs servi à les caractériser en temps réel. Pour ces événements les plus récents, les informations relatives aux niveaux marins ont été fournis par le SHOM, ceux relatifs aux vagues par le CEREMA.

2.1. Tempêtes anciennes supplémentaires analysées

Le travail de recherche et de documentation d'événements anciens s'est poursuivi sur la base de documents très divers :

- anciens barogrammes disponibles pour certaines dates sur quelques sémaphores ;
- articles de presse récupérés aux archives départementales ;
- bulletins climatologiques quotidiens...

Les collègues des centres territoriaux de Météo-France, mobilisés à cette occasion, ont réalisé un véritable travail de bénédictin pour synthétiser un grand nombre de documents. Au final, il a été tout à fait possible de caractériser assez finement les dépressions ayant généré des tempêtes extrêmes sur la période recherchée 1890/1949. Tout comme les phénomènes plus récents, leur trajectoire et intensité ont été finement reproduites. Des fiches descriptives ont été rédigées pour chaque événement, sous la forme d'un rapport de synthèse d'une dizaine de pages, elles permettent de constituer une mémoire collective de ces tempêtes qu'il ne faut surtout pas oublier. Ce travail se poursuit encore à l'automne 2014, à l'heure de la rédaction de ce rapport, mais les objectifs initiaux de caractériser ces tempêtes du passé ont été atteints. Même si en la matière, un inventaire exhaustif est tout à fait illusoire, cette base documentaire recense une grande majorité des événements météorologiques majeurs ayant touché la région Bretagne élargie.

Le tableau suivant présente un état des événements anciens traités fin août 2014.

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

Date début (jj/mm/aaaa)	Etat	Remarque
09/03/1891	fait	trajectoire de la dépression difficile à établir
04/12/1896	fait	atypique : événement sans équivalent (950 hPa à Brest et déplacement plein Est)
15/02/1900	en cours	
03/02/1904	fait	dépression stationnaire au large, grosses vagues, vives eaux
03/12/1909	fait	3 dépressions circulant sur l'Angleterre, grosses vagues
08/01/1924	fait	dépression 970 hPa sur terre (cf. 26/12/1999 et 27/12/1999), vives eaux
08/10/1924	fait	dépression 995 hPa en Manche très classique, vives eaux
16/11/1928	fait	succession de dépressions
19/09/1930	fait	dépression assez éloignée (Irlande), nombreux naufrages
22/02/1935	en cours	
17/01/1937	en cours	
27/01/1937	fait	Atypique, dépression 975 hPa dans le golfe Gascogne, flux SE, vives eaux
13/03/1937	fait	3 dépressions, la 3 ^{ème} à 975 hPa en Manche, vives eaux
02/06/1938	fait	tempête classique mais estivale
07/08/1948	fait	dépression 975 hPa en Manche ouest, situation hivernale classique mais en plein été , similitude de trajectoire avec octobre 1987

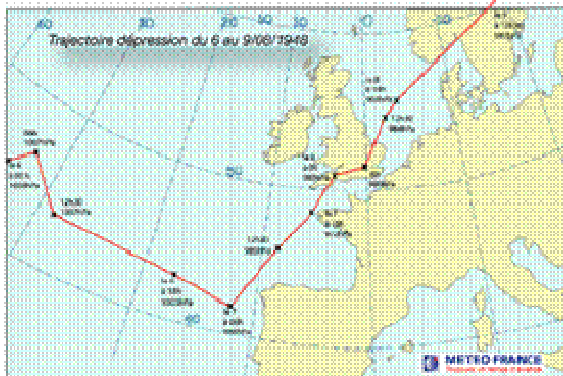
Etat des tempêtes anciennes analysées fin août 2014 et caractéristiques principales

Les événements du 16/11/1940 et du 11/01/1943 n'ont pu être documentés comme prévu initialement. En effet, les bulletins climatologiques quotidiens d'études correspondants (BQE), qui constituent la principale source d'informations utilisable pour ces tempêtes anciennes, ne sont pas disponibles pendant cette période de guerre. Cependant, au cours du projet, il est apparu que certaines archives météorologiques entreposées à Fontainebleau pourraient permettre de documenter ces deux tempêtes (observations de sémaphores allemands ou français disponibles sous forme papier). Leur analyse nécessiterait un gros travail qu'il n'a pas été possible de mener lors du projet VIMERS-1.

2.2.1. Quelques exemples

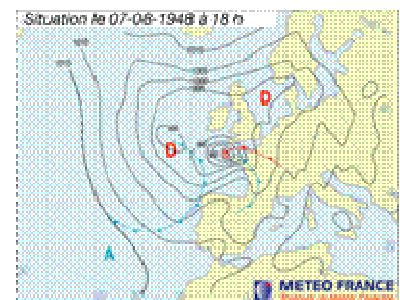
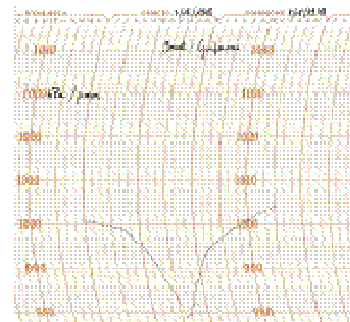
A titre d'exemple, quelques éléments constituant les fiches tempêtes de ces événements anciens constituées au cours du projet VIMERS-1 sont présentés ci-après.

Tempête estivale : 7 août 1948



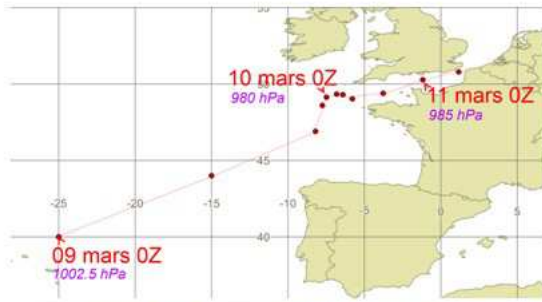
972 hPa sur Quessant à 18h (955 Hpa le 15/10/1987)

**Coefficient 106 à la pleine mer du soir vers 19h à Brest
Lame d'eau de 40 mm en moyenne
sans doute une très forte surcote et des niveaux marins très élevés (quais submergés de 50 cm signalés dans la presse à plusieurs endroits)**



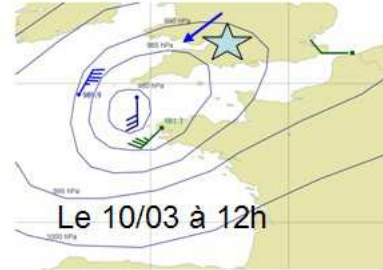
Extraits de la fiche tempête de l'événement ancien du 7 août 1948

Tempête 10 mars 1891 : the « great storm »



Dépression quasi stationnaire : grosses vagues

Surcote 20 cm à PM le 10/03 (105) et le (114) 12/03



« Brest : Le mauvais temps qui règne depuis avant-hier [le 9], a surtout été sensible au port de commerce. La mer était démontée et les lames déferlaient par-dessus la jetée de l'ouest. D'autre part par suite de la grande marée, les quais étaient submergés. Certaines cabanes du 5e bassin ont eu leur rez-de-chaussée complètement envahi par l'eau. [...] »

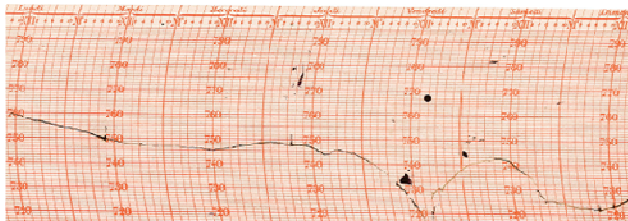
Dépêche de Brest du 11 mars 1891



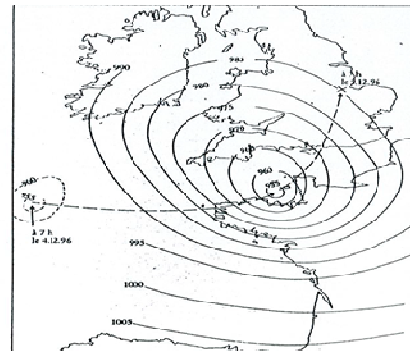
Neige Sud-Ouest Angleterre

Extraits de la fiche tempête de l'événement ancien du 10 mars 1891

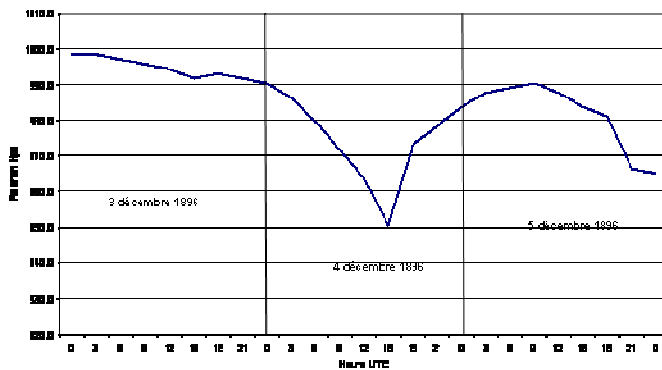
4 décembre 1896



Barogramme P. CINTÉ ST MATHEU



4 décembre 1896
Sans doute la pire tempête que la Bretagne ait connu sur la période Vimiers 1890/2014

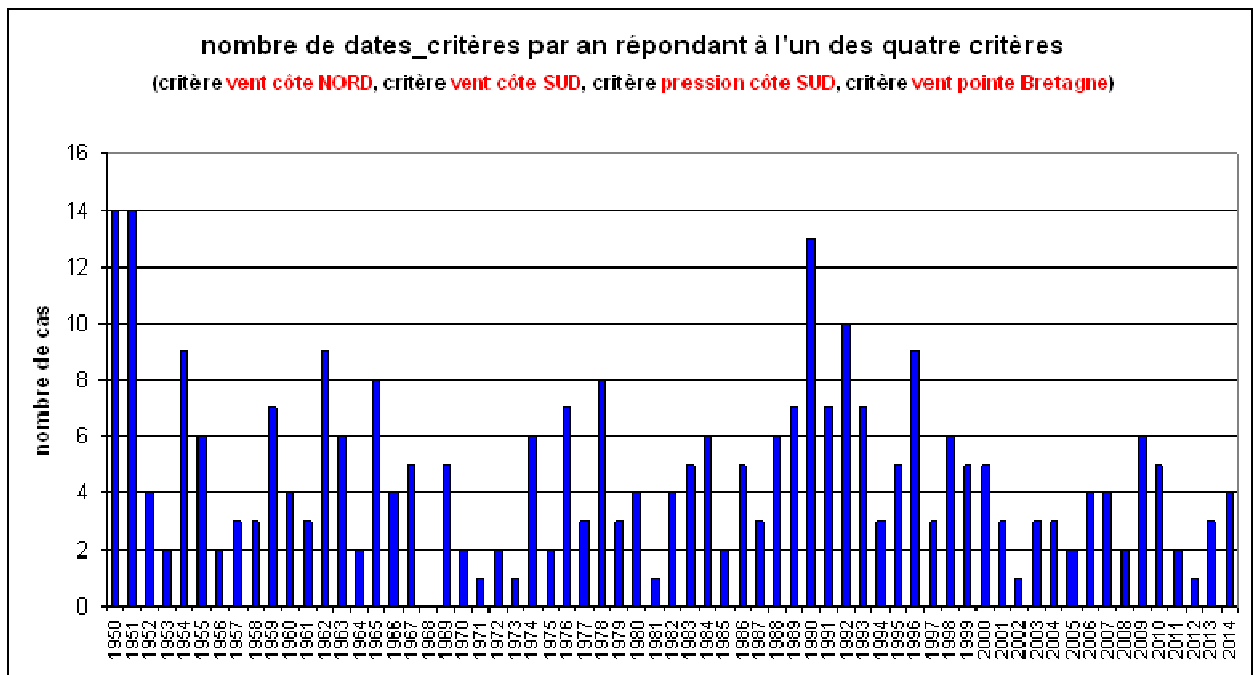


Extraits de la fiche tempête de l'événement ancien du 4 décembre 1896

2.1. Rajout des événements récents (hiver 2013/2014)

Dès décembre 2013 avec une première tempête "Dirk", un rapide courant d'Ouest perturbé s'est mis en place sur le proche Atlantique. Cette situation très agitée s'est poursuivie jusque début mars 2014. Au cours de cette période, des tempêtes fortes mais non exceptionnelles se sont succédées. Elles étaient caractérisées par des vents soutenus et incessants, générant de très grosses vagues. Ces dernières ont parfois produit des dégâts importants lors des périodes de grandes marées lorsqu'elles ont déferlé sur les côtes bretonnes exposées (principalement fin décembre 2013, début février et début mars 2014).

Au final, d'après les critères définis lors de VIMERS-0 (par exemple, 50 % des sémaphores du littoral Nord touchés par des vents persistants d'Ouest à Nord-Est de plus de 40 nœuds), sept événements supplémentaires ont été intégrés dans la base de données VIMERS. Ces tempêtes de l'hiver 2013/2014 ont été caractérisées en termes de trajectoire et d'intensité et ont fait l'objet de fiches tempêtes détaillées au même titre que tous les événements déjà identifiés dans VIMERS-0 et que les événements anciens.



Nombre d'événements VIMERS par année depuis 1950

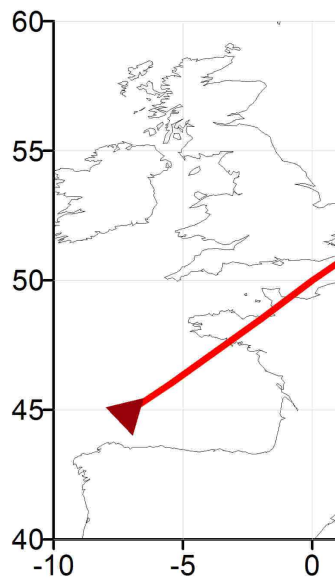
Les sept événements supplémentaires de l'hiver 2013/2014 sont répartis sur les deux années de fin.

2.3. Recherche d'une tempête analogue

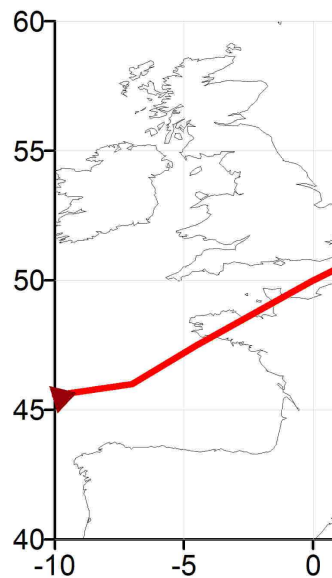
A ce jour, la base de données synthétique VIMERS contient des informations précises sur la trajectoire et l'intensité des tempêtes sur la période 1979/2012 (plus les cinq événements légèrement antérieurs), auxquelles ont été ajoutées celles concernant les événements les plus récents qui se sont produits depuis et celles concernant les quatorze tempêtes plus anciennes (période 1890/1950) actuellement traitées. Même si cela n'avait pas été envisagé initialement, il a semblé intéressant de travailler sur la mise au point d'une méthode permettant de retrouver, pour une tempête donnée, la meilleure tempête analogue possible.

Ce travail exploratoire, dont la méthode est détaillée dans un rapport spécifique (rapport technique n° I : tests sur les tempêtes analogues), a abouti à la mise en place d'algorithmes spécifiques permettant de retrouver la tempête connue ayant la trajectoire la plus ressemblante ou celle ayant les vents associés les plus proches...

Trajectoire de la tempête n°6
du 28/02/2010



Trajectoire de la tempête n°82
du 08/12/2006



Exemple (à droite) de tempête "analogue en termes de trajectoire" à la tempête "Xynthia" (à gauche)

Le travail appliqué à la tempête "Xynthia" (trajectoire du 28/02/2010) donne pour meilleure analogue en termes de trajectoire la tempête du 08/12/2006, celle-ci ayant cependant, par ailleurs, une intensité moindre.

Aucun des différents algorithmes mis au point n'est fiable à 100 % et ne peut être utilisé de façon automatique. Chacun propose un ou des analogues plus ou moins recevables en fonction du point de vue traité et de la marge d'erreur autorisée. Une étape finale d'expertise est donc absolument nécessaire pour opérer un tri.

3. REJEU DE 25 SITUATIONS DATES DE REFERENCE

L'un des objectifs du projet VIMERS-1 était de générer des forçages météorologiques qui permettraient ensuite de tester différentes chaînes de modélisation de niveaux marins et de vagues. Pour cela, il a été nécessaire de rejouer, avec des modèles atmosphériques (de dernière génération), les situations des épisodes de tempêtes recensés et documentés dans la base VIMERS et de valider les simulations obtenues.

Compte tenu de l'ampleur de la base VIMERS, il aurait été redondant de vouloir rejouer les forçages météorologiques associés à l'ensemble des événements qui y sont décrits. Seules les 27 tempêtes de référence, sélectionnées à l'issue du projet VIMERS-0 comme représentatives de la variabilité des tempêtes bretonnes, ont donc été traitées.

3.1. Rappel de la méthode de sélection des situations de référence

Les situations de référence sont reprises dans le tableau suivant.

La sélection de ces dates s'est effectuée par méthode statistique pour les sept premières (surlignées de bleu dans le tableau). Elles correspondent à la date de l'événement tempétueux le plus proche du centre de la classe de la typologie météorologique définie dans VIMERS-0.

La liste a été complétée après un travail d'expertise :

- les neuf dates suivantes (surlignées de jaune dans le tableau) se caractérisent par un paramètre remarquable (force de vent, pression minimale, déplacement rapide, longueur de la trajectoire...);
- les onze dernières dates (surlignées de rose dans le tableau) correspondent à des événements tempétueux ayant donné lieu à des dégâts humains ou matériels importants.

Classes	Evénements	Motivation
4	05/12/1988 (107)	Centre classe
1	08/02/1990 (113)	Centre classe
3	24/03/1992 (47)	Centre classe
2	07/12/1992 (123)	Centre classe
7	03/01/1998 (136)	Centre classe
5	13/02/2005 (79)	Centre classe
6	26/02/2010 (89)	Centre classe
4	13/02/1972 (12)	12 B
4	07/02/1996 (95)	12 et 11 B
3	20/02/1996 (133)	anticyclone
2	06/11/2000 (141)	Longueur (durée)
7	10/01/1993 (51)	PC_tot* minimale
5	26/02/1989 (38)	Pzmin* basse, plus de vent côte N que S
5	20/12/1991 (46)	Pzmin élevée, PC_tot faible
5	25/05/1989 (108)	Pzmin minimale
1	23/11/1984 (30)	rapidité
6	06/07/1969 (10)	dégâts
6	15/10/1987 (9)	dégâts
6	03/02/1990 (2)	dégâts
1	26/12/1999 (4)	dégâts "Lothar"
2	10/03/2008 (7)	dégâts "Johanna"
5	23/01/2009 (85)	dégâts "Klaus"
4	27/12/1999 (5)	dégâts "Martin"
1	09/05/2009 (86)	dégâts "Quinten"
2	09/12/2007 (8)	dégâts vagues fortes
6	28/02/2010 (6)	dégâts "Xynthia"
1	16/12/2011 (93)	"Joachim" (PEARP suggère des conditions plus extrêmes)

dates sélectionnées pour rejouer les situations avec des tmodèles atmosphériques

*PC_tot est la pression minimale du centre dépressionnaire sur tout l'événement tempétueux et Pzmin la pression minimale sur la région élargie.

On constate que la représentation des classes y est relativement équitable.

Les dates antérieures à 1979, le 9 juillet 1969 et le 13 février 1972, pour lesquelles les ré-analyses ERA INTERIM n'étaient pas disponibles, n'ont pas pu être rejouées. En conséquence, la validation n'a concerné que 25 dates du tableau ci-dessus.

3.2. Méthodologie de descente d'échelle

La simulation météorologique des 25 situations de référence retenues a été réalisée par le service DP/SERV/BEC de Météo-France à Toulouse. Les chaînes de calcul utilisées étaient les mêmes que celles ayant servi au projet HOMONIM (**H**istorique **O**bservation **M**odélisation des **N**iveaux **M**arins).

La méthode de simulation a utilisé une chaîne de descente d'échelle imbriquée ayant pour base la ré-analyse ERA INTERIM (résolution 100 km). Une première descente d'échelle a été réalisée avec le modèle Arpège (résolution 50 km), puis une seconde avec ce même modèle mais à résolution horizontale 0,1 .

Pour obtenir les meilleurs jeux de forçage pour une tempête se produisant un jour J donné, les simulations ont commencé 72 heures avant. Elles ont été relancées toutes les 12 heures pour recalculer avec les analyses. Au total, six simulations ont donc été nécessaires pour chaque tempête.

Ces chaînes de calcul sont généralement performantes pour fournir au pas de temps horaire à d'autres modèles (de vagues, de surcotes...) des données de forçage météorologique fiables. Cependant, elles peuvent être parfois prises en défaut sur certains événements (notamment en cas de tempête "explosive") ou fournir des champs de vent et pression sous-estimés ou surestimés, selon les configurations météorologiques. Leur utilisation ultérieure pour simuler des impacts en termes de vagues et surcotes ne pouvait donc se faire qu'après validation.

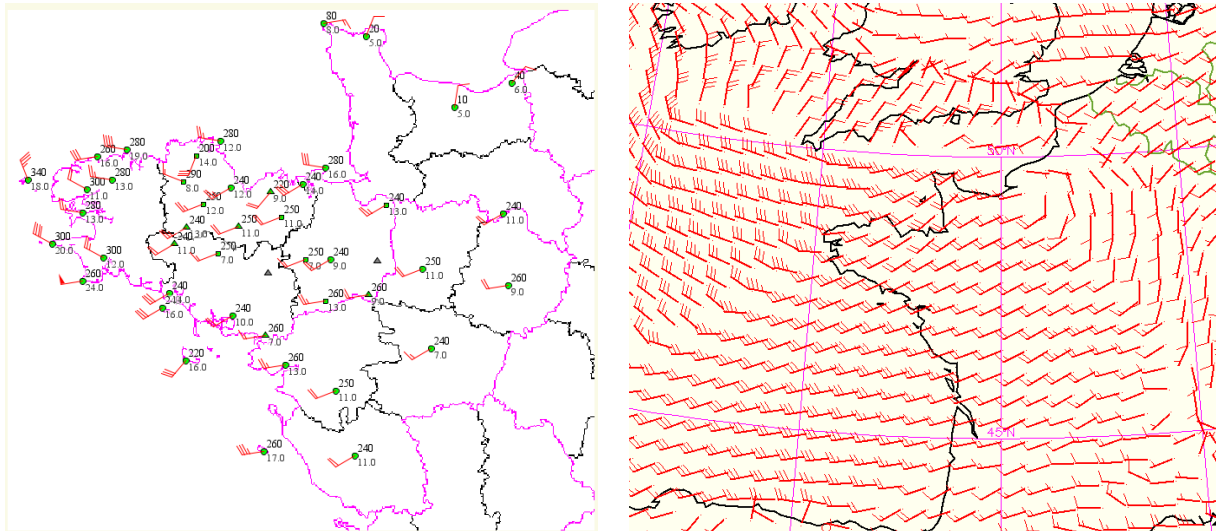
3.3. Validation et mise à disposition des données de forçage

Chacune des 25 tempêtes de référence a donc été "rejouée" à l'aide de la descente d'échelle. Des champs modélisés de vent à 10 mètres horaire et de pression au niveau de la mer étaient donc disponibles. Le travail de validation a consisté à comparer, pour chaque événement, la variabilité spatio-temporelle de ces champs météorologiques issus de la modélisation avec celle des observations disponibles (en général les mesures des sémaphores et quelques observations en mer). Ce travail a dû être fait manuellement pour pouvoir tenir compte de la spécificité de chaque observation en fonction du contexte météorologique. C'est ainsi que les surestimations connues de certains sémaphores par effet de falaise dans certains secteurs de vent ont pu être prises en compte (ex. la Pointe du Raz).

Ce travail assez fastidieux a fait l'objet d'un rapport complet de validation (rapport technique n° II : validation météorologique des jeux des vingt-cinq situations de référence).

La figure suivante présente un exemple des deux sources d'information à comparer, juxtaposées, pour les vents à 10 mètres du 5 décembre 1988 à 12 UTC.

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON



Vents à 10 mètres le 5 décembre 1988 à 12 UTC à comparer, observation à gauche et simulation à droite

Le plus souvent, sur la base des ré-analyses ERA INTERIM, la chaîne de calcul utilisée a permis d'obtenir des champs de forçage météorologique (vent à 10 mètres et pression au niveau de la mer) qui se rapprochaient très bien de la réalité. Cependant, pour certaines tempêtes et notamment les cas de petite dépression très mobile (ex. 15/10/1987 et 26/12/1999), les champs météorologiques obtenus n'étaient pas assez fidèles à la situation réelle. Ces tempêtes singulières ont fait l'objet de traitements spécifiques pour obtenir un champ météorologique plus réaliste. C'est ainsi que l'utilisation d'une simulation de la PRévision d'Ensemble d'ARPEGE (PEARP) disponible a permis d'obtenir des champs de vent et de pression très réalistes pour décrire la tempête du 15/10/1987. Un document sur l'utilité de la PEARP est disponible (rapport technique n° III : utilité de la PEARP). Par contre, cette méthode n'a pas donné de résultats satisfaisants pour la tempête du 26/12/1999 (qui reste donc encore difficilement "rejouable").

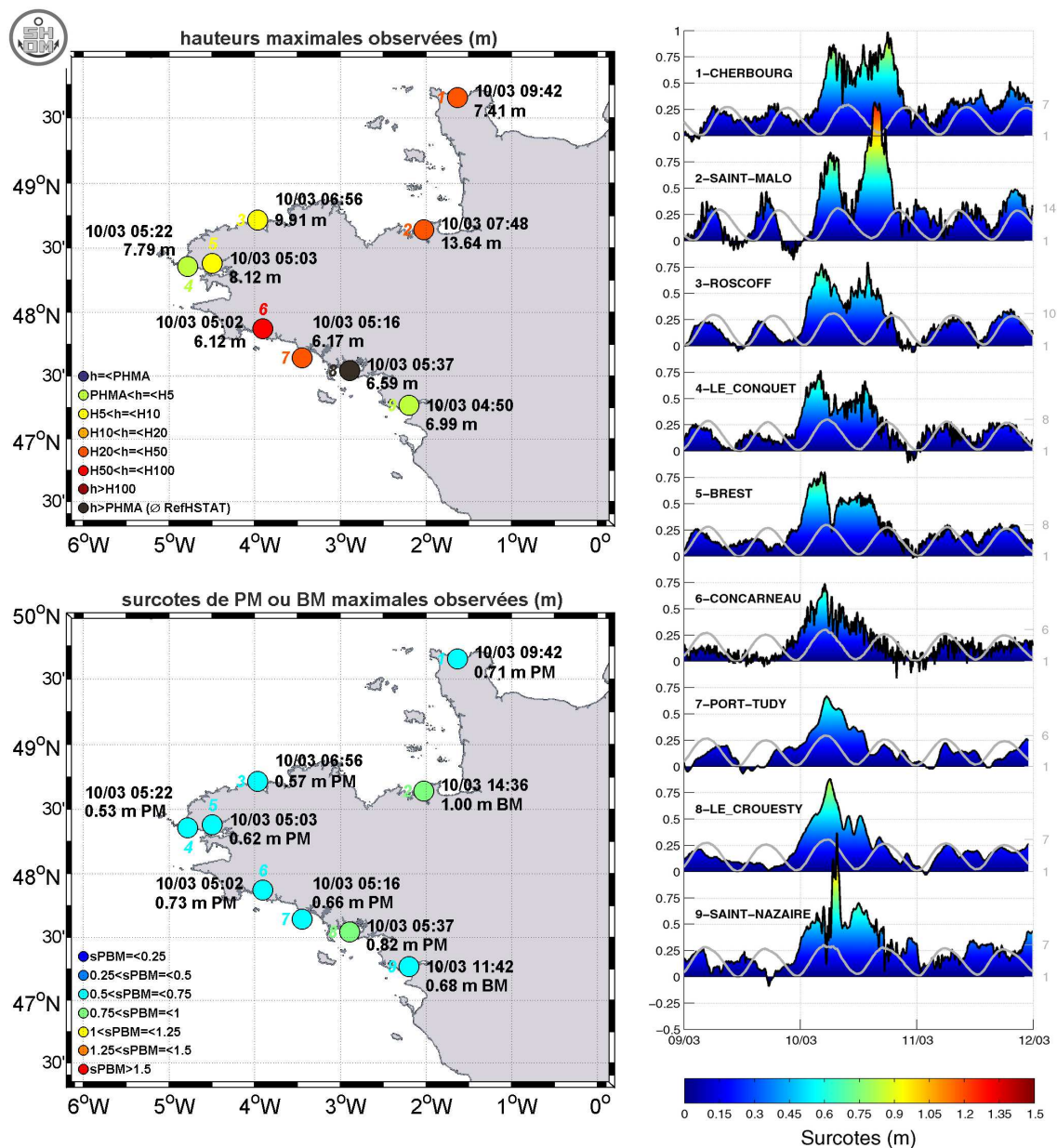
En outre, il arrive dans certaines situations que le vent modélisé à 10 mètres soit un peu en deçà des vitesses réelles enregistrées, mais que sa variabilité spatio-temporelle soit fidèle à la réalité. Il a alors été proposé d'utiliser le champ de vent simulé à 50 mètres, voire 100 mètres (les valeurs simulées à l'un de ces niveaux étant plus conformes aux observations de vent à 10 mètres disponibles pour ces tempêtes), comme champ de forçage du vent à 10 mètres.

Au final, pour la grande majorité des 25 dates de référence, un champ de vent et un champ de pression tout à fait réalistes ont pu être simulés ; ces champs ont permis de forcer les modèles de vagues et de surcotes disponibles à Météo-France pour certains événements (les résultats obtenus avec ces modèles sont examinés lors des chapitres suivants). Les champs météorologiques de forçage, disponibles sous forme de fichiers "GRIB", ont été mis à disposition des membres du projet afin de tester des simulations avec d'autres modèles d'hydrodynamique maritime nécessitant des champs météorologiques en entrée.

3.4. Enrichissement du contenu des fiches tempêtes des événements de référence

Les 25 événements de référence validés constituent un échantillon de tempêtes susceptibles de provoquer des grosses vagues et/ou submersions marines sur les côtes.

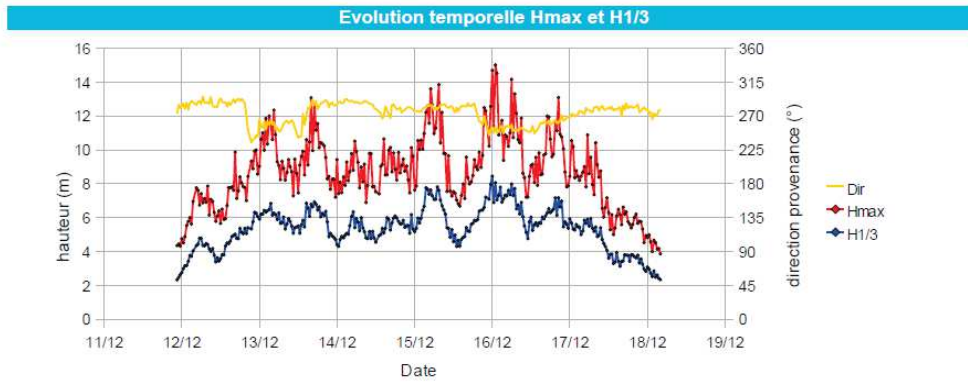
Comme rappelé précédemment, une fiche tempête décrivant la situation météorologique et les impacts réels survenus existait déjà pour chacun de ces événements ; les autres partenaires du projet VIMERS ont pu compléter certaines des fiches à l'aide des informations concernant leur domaine et qui étaient en leur possession : il s'agit des données marégraphiques enregistrées pour le SHOM et des données de vagues valorisées par le CEREMA. Cela a permis d'élargir le spectre de connaissance de ces tempêtes de référence.



Exemple de niveaux marins figurant dans la fiche de la tempête de référence du 10 mars 2008 (source SHOM)

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

Direction moyenne de provenance au pic (Dir) : 235° à 296°



*Vagues à la bouée Les Pierres Noires (48°17 N 04°58 W) entre le 12 et le 17 décembre 1998
(source CEREMA)*

4. EVALUATION DES VAGUES ASSOCIEES A CES EVENEMENTS SURVENUS

4.1. Limites de l'exercice

Il aurait été redondant et très fastidieux de vouloir simuler les vagues associées à toutes les tempêtes de référence. Certaines tempêtes récentes (par exemple le 9 décembre 2007, le 28 février 2010...) sont déjà très bien décrites à l'aide des modèles de vagues opérationnels à l'époque.

Le choix a donc été fait de ne lancer les simulations de vagues que sur des événements qui n'avaient pas déjà été amplement étudiés et tels que les différents types de tempêtes susceptibles de toucher la région élargie soient balayés (pour permettre d'évaluer les impacts en termes de vagues le long de l'ensemble des côtes - par exemple simulations pour des événements de forts vents d'ouest pour l'Atlantique, mais de Nord-Ouest ou Nord-Est pour les côtes de la Manche).

Les six dates retenues sont les suivantes :

Dates	Zone impactée
Tempête du 15/16 octobre 1987	Pointe Bretagne et côte Sud
Tempête du 10 janvier 1993	Pointe Bretagne et côte Sud
Tempête du 20 février 1996	Côte Nord
Tempête du 10 mars 2008	Pointe Bretagne et côte Sud
Tempête du 13 février 2005	Pointe Bretagne et côte Nord
Tempête du 7 février 1996	Pointe Bretagne et côte Sud

Tempêtes de référence retenues pour les simulations de vagues

4.2. Méthode de simulation des vagues et de validation

L'objectif de cette expertise, retranscrite dans le rapport technique n° IV : simulation de vagues, était de valider des données du modèle de vagues MFWAM, actuellement opérationnel à Météo-France. Pour cela, les sorties de modèle ont été comparées aux données mesurées par les réseaux de bouées de Météo-France et/ou du CEREMA, lorsqu'elles étaient disponibles.

Par ailleurs, une base de données d'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) a fourni, pour certaines situations, des données de hauteurs significatives de vagues issues de relevés des satellites ERS 1 et 2, TOPEX, Poséidon, Jason1 et GEOSAT Follow-On. L'heure du passage de ces satellites étant souvent en léger décalage temporel par rapport aux heures des prévisions, ont en fait été comparées l'allure générale des valeurs sur les traces de ces satellites et la distribution spatiale des hauteurs prévues.

Le modèle MFWAM est le modèle de vagues actuellement opérationnel à Météo-France. Pour les besoins de l'étude, une descente d'échelle du modèle a été opérée sur les 20 jours précédant l'événement tempétueux :

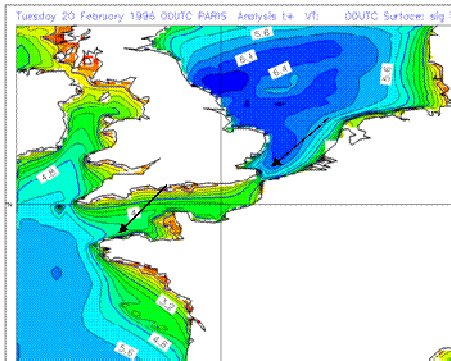
- pour le grand domaine, les champs de vent à 10 mètres nécessaires, tout comme les champs de glace, étaient ceux issus du modèle européen, maille 0,5 ° ;
- pour le domaine imbriqué les vents ALADIN, maille 0,1 ° ont été utilisés quand ils existaient, c'est-à-dire à partir de 1997 (avant, une simple interpolation des vents du grand domaine a été réalisée).

Pour les deux domaines, les prévisions de vent validées issues de la descente d'échelle ERA INTERIM/ARPEGE (Cf. partie 3) ont été pris en compte pour les dernières 72 heures.

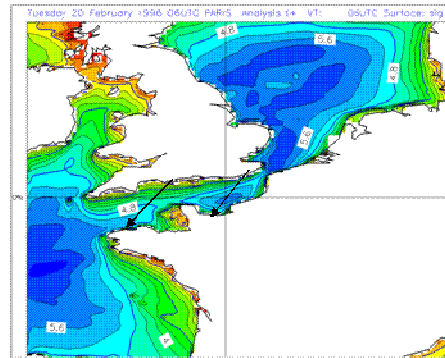
Les cartes de vagues proposées correspondent aux hauteurs des vagues 1/3 de la mer totale (mer du vent + houle).

4.3. Quelques résultats

Les vagues du 20/02/1996



Le 20/02 à 00h

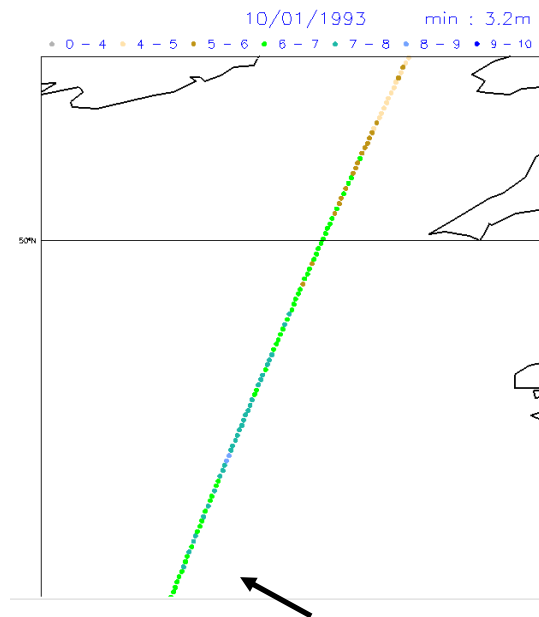
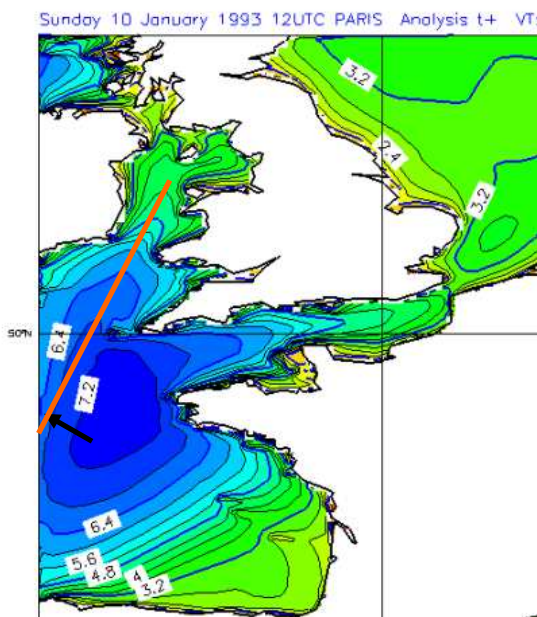


Le 20/02 à 06h

Vagues de l'ordre de 5m entre Ouessant et Bréhat
De direction Nord-Est (marée de 113)
Gros dégâts Roscoff, Pléneuf Val A, Perros G



Cas du 20/02/1996 : exemples de sorties du modèle MFWAM et de quelques éléments d'illustration



*Sortie du modèle MFWAM pour le 10 janvier 1993 à 12 UTC
et trace d'un passage du satellite ERS 1 pour le 10 janvier à 11h39*

5. SURCOTES ET NIVEAUX MARINS POTENTIELS DE CERTAINS EVENEMENTS METEOROLOGIQUES REELS

L'objet de ces travaux était de simuler les surcotes et les hauteurs d'eau totales lors de certains événements choisis parmi la liste des 25 événements météorologiques de référence validés.

Pour le choix de ces événements, il fallait tout d'abord que les forçages météorologiques aient été validés (Cf. partie 3). Par ailleurs, ont été ciblées les tempêtes de forte intensité dont le centre dépressionnaire circulait au plus près de la région ou celles lors desquelles de forts niveaux de mer ou de fortes surcotes ont été effectivement observés.

De nombreux événements récents, survenus par forte marée, ayant déjà été simulés dans le cadre du projet HOMONIM, les événements plus anciens, avant 1999, ou ceux survenus par faible coefficient ont donc été privilégiés.

Sept dates ont ainsi été retenues. Il s'agit de situations qui ont provoqué des vents violents venant du Sud-Ouest, de l'Ouest, du Nord-Ouest et du Nord-Est afin d'être en mesure d'évaluer les impacts sur l'ensemble des côtes bretonnes dont l'exposition aux vents violents est très variable compte tenu de la topographie du littoral.

Date de la tempête	Motif du choix, caractéristiques de la tempête
7 février 1996	le centre de la dépression passe à proximité de Bréhat, vent de nord-ouest fort
16 décembre 2011	le centre de la dépression circule en Manche, vent de sud-ouest fort
23 janvier 2009	le centre de la dépression circule sur le sud de l'Angleterre, vent d'ouest à nord-ouest fort
23 novembre 1984	le centre de la dépression circule sur le sud de l'Angleterre, vent de sud-ouest fort
24 mars 1992	la dépression descend de la mer du Nord vers la Méditerranée, vent de nord-est fort en Manche
25 février 1989	le centre de la dépression circule en Manche, vent d'ouest à nord-ouest fort sur la pointe de Bretagne et les côtes de l'Atlantique
15/16 octobre 1987	le centre de cette dépression creuse passe sur Ouessant, vent de sud-ouest fort

Tableau des dates de référence retenues pour les simulations de surcote

Enfin, l'impact en termes de niveaux marins étant fortement lié à la conjonction d'une forte marée avec une surcote, il a été proposé une méthode originale consistant à rejouer ces tempêtes réelles avec les conditions fictives de pleine mer lors d'une marée de vives eaux, cela pour en évaluer de potentiels impacts extrêmes.

La tempête "Dirk" du 23/12/2013, survenue en cours de projet, a été rajoutée aux sept dates.

5.1. Principe des simulations

Le modèle de surcotes qui a été utilisé est le modèle HYCOM du SHOM récemment installé en opérationnel sur les chaînes de calcul de Météo-France. Ce modèle a été forcé par les champs validés de pression et de vent issus de la chaîne de modélisation ERA INTERIM/ARPEGE (descente d'échelle) décrite en partie 3.

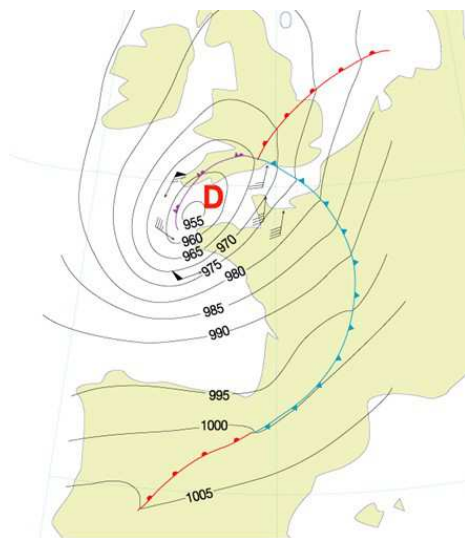
Rappel concernant les forçages météorologiques validés : le niveau du vent modèle retenu est celui pour lequel les valeurs sont les plus proches des observations (souvent le niveau 10 mètres, mais parfois 50 mètres ou 100 mètres). Pour le cas particulier du 15/10/1987 où la descente d'échelle ne donnait pas de résultats satisfaisants, ont été utilisés les champs de vent et de pression d'une situation extrême simulée par la prévision d'ensemble PEARP qui correspondait beaucoup mieux à la réalité.

Les résultats de surcotes sont disponibles sur une dizaine de ports bretons allant de Saint-Malo à Saint-Nazaire.

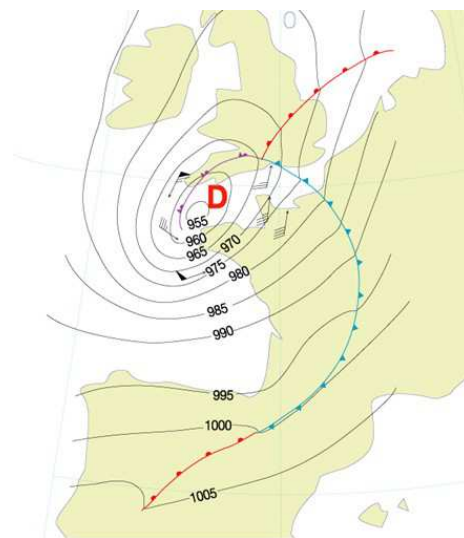
5.2. Méthodologie pour la prise en compte d'une marée fictive

Rejouer une tempête réelle par marée basse peut être intéressant en termes de surcote extrême mais ne permettra pas d'avoir des niveaux marins extrêmes. Il a été proposé ici de rejouer les tempêtes avec les conditions météorologiques réelles mais avec des conditions de marées fictives (en l'occurrence fortes marées et pleine mer).

Les deux cartes ci-dessous illustrent l'esprit de la méthodologie. La situation météorologique du 16 octobre 1987 à 00 UTC était associée à une marée de mortes eaux, elle a été transposée le 7 octobre 1987 à 18 UTC, au moment de la pleine mer de la marée de vives eaux la plus proche (coefficient 106).



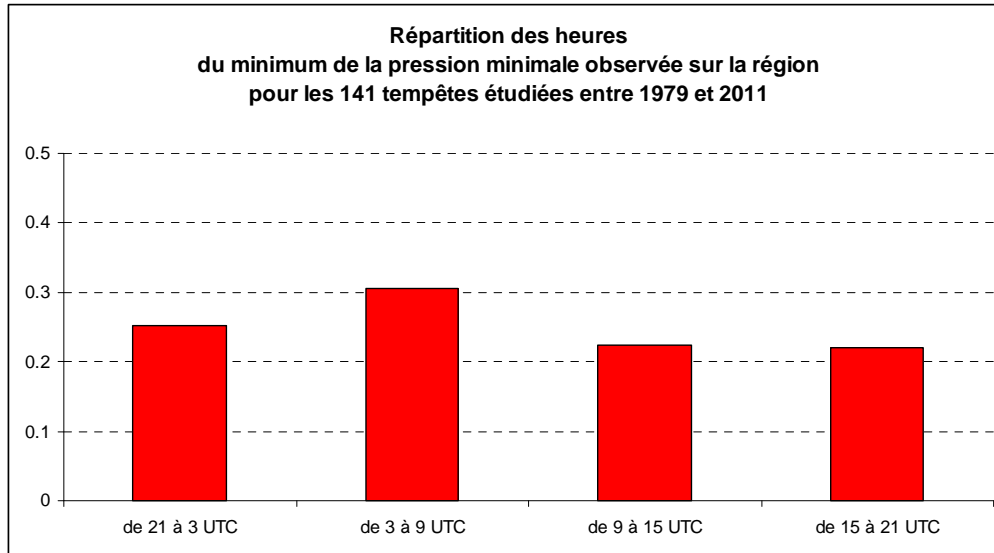
*Tempête réelle le 16/10/1987 à 00 UTC
(coefficient 25)*



*Impact fictif le 07/10/1987 à 18 UTC
(coefficient 106)*

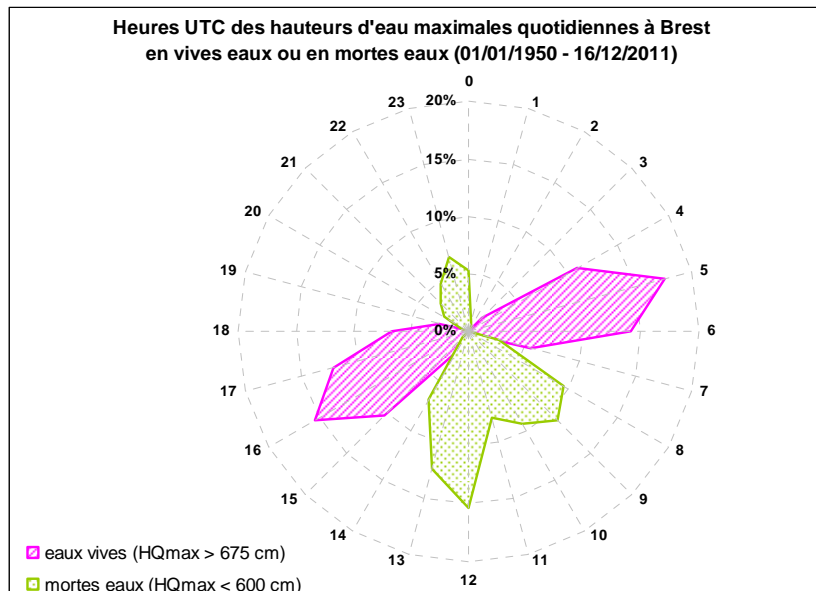
ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

Pour appliquer cette méthodologie, il a été nécessaire de montrer au préalable qu'une tempête avait autant de chances de passer un jour de vives eaux qu'un jour de mortes eaux, par pleine mer que par basse mer. Ce travail a fait l'objet d'un rapport spécifique (rapport technique n° V : occurrence tempête et grande marée). Quelques illustrations extraites de ce rapport sont présentées ci-après.



Répartition des heures de passage des tempêtes sur la région Bretagne élargie

Un test statistique du χ^2 montre qu'il y a bien indépendance entre le passage d'une tempête et l'heure : une tempête a donc autant de chances de toucher la région autour de midi qu'autour de minuit. Cependant, les tempêtes étant très majoritairement hivernales, période où la nuit est beaucoup plus longue que le jour, celles-ci passent donc le plus souvent "de nuit".



*Heures des hauteurs d'eau maximales quotidiennes à **Brest**
en vives eaux et en mortes eaux*

Les pleines mers de vives eaux se produisent toujours autour de 5 UTC ou 16 UTC à Brest (décalage maxi de 2h/2h30 en Bretagne pour Saint-Malo).

Cette règle physique se devait donc d'être respectée lors du forçage de la marée dans les simulations avec marée fictive.

Ces travaux sur l'indépendance entre marée et tempête ont permis d'envisager de rejouer un jour de grande marée une tempête passée effectivement par coefficient faible. Il a alors suffi de changer la date des fichiers de forçage météorologique de la tempête et d'appliquer ce forçage, quelques jours avant ou après la date réelle, à une date correspondant à une plus forte marée.

Pour chacune des huit dates traitées, les coefficients de marée de pleine mer les plus élevés à la date la plus proche de l'événement tempétueux ont donc été recherchés (tableau suivant).

Date réelle de la tempête (coefficient)	Date de rejeu (coefficient)
7 février 1996 (87)	20 février 1996 (113)
16 décembre 2011 (71)	26 novembre 2011 (102)
23 janvier 2009 (49)	13 janvier 2009 (103)
23 novembre 1984 (102)	23 novembre 1984 (102)
24 décembre 2013 (58)	3 janvier 2014 (108)
24 mars 1992 (64)	19 mars 1992 (111)
25 février 1989 (73)	9 mars 2009 (116)
15/16 octobre 1987 (24/25)	7 octobre 1987 (106)

Tableau de correspondance date réelle / date de rejeu

Avec les champs de vent et de pression de forçage validés (donc considérés comme représentatifs des conditions météorologiques effectivement observées), Météo-France a refait tourner le modèle de surcote pour apprécier les hauteurs d'eau totale (marée + surcote) qui auraient été enregistrées si l'événement tempétueux avait eu lieu par marée de vives eaux, au moment de la pleine mer.

Les heures de marée de référence étaient celles de Brest. Pour les ports de la Manche et de l'Atlantique la propagation de l'onde de marée s'effectue avec un léger écart temporel par rapport à celle de Brest. Pour ajuster au mieux le pic de surcote à l'heure de la Pleine Mer et pour tenir compte du décalage de l'onde de marée, le modèle de surcote a proposé, pour certaines situations, plusieurs décalages temporels proches.

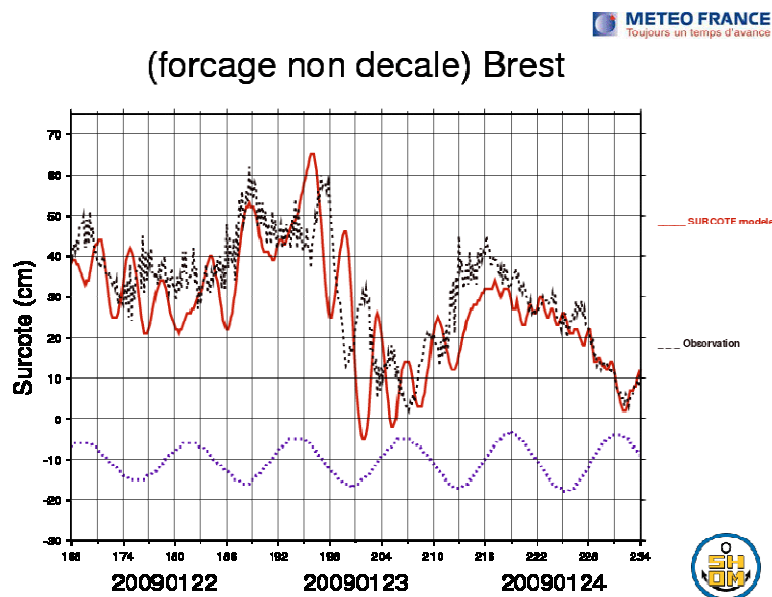
Pour chacune des situations, le modèle de surcote a également fourni les valeurs simulées sans décalage temporel (situation réelle).

L'ensemble des travaux réalisés sur les simulations de surcotes pour les huit situations retenues avec marée fictive a fait l'objet d'un rapport complet de validation (rapport technique n° VI : calcul de surcotes fictives avec décalage de la marée). Les principaux résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

5.3. Résultats et validation des simulations de surcotes et des niveaux marins

En premier lieu, pour certaines des dates pour lesquelles les surcotes ont été simulées, la comparaison entre les données marégraphiques fournies par le SHOM a montré un très bon comportement du modèle HYCOM sur certains ports bretons : le modèle a reproduit fidèlement les surcotes de chaque tempête lorsqu'elles étaient rejouées avec la marée réelle. Ces résultats ont également conforté les choix qui ont été faits lors de la validation des simulations météorologiques.

L'exemple du 22/01/2009, ci-après, montre cette plutôt bonne conformité entre les observations (courbe noire) et le modèle (courbe rouge).



Brest, simulation de surcotes HYCOM pour la tempête du 23/01/2009 à 00 UTC non décalée (marée réelle de coefficient 49)

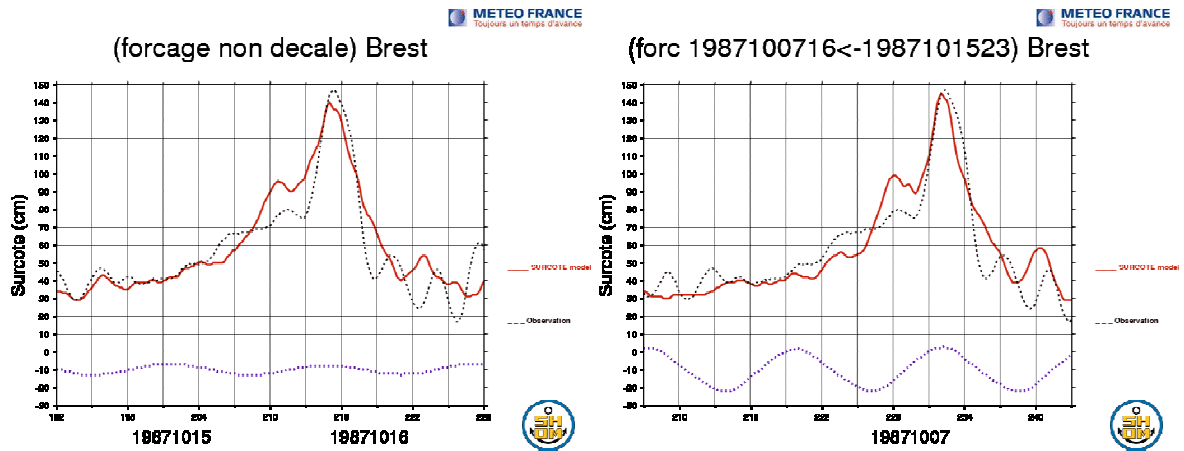
Remarque : pour cette situation, les données mesurées par le marégraphe de Brest étaient disponibles. Dans d'autres cas, pour certains ports, les informations chiffrées étaient absentes ou parcellaires.

En appliquant le décalage temporel d'une tempête comme décrit dans le paragraphe précédent, des niveaux de surcote très proches de ceux simulés sans décalage ont été obtenus (voir graphes ci-dessous pour Brest et Saint-Nazaire).

Ce résultat semble valable sur la majorité des ports pour les huit situations rejouées, avec et sans décalage. Cependant, pour quelques ports, le résultat a été plus contrasté (voir figure ci-dessous pour le Mont-Saint-Michel).

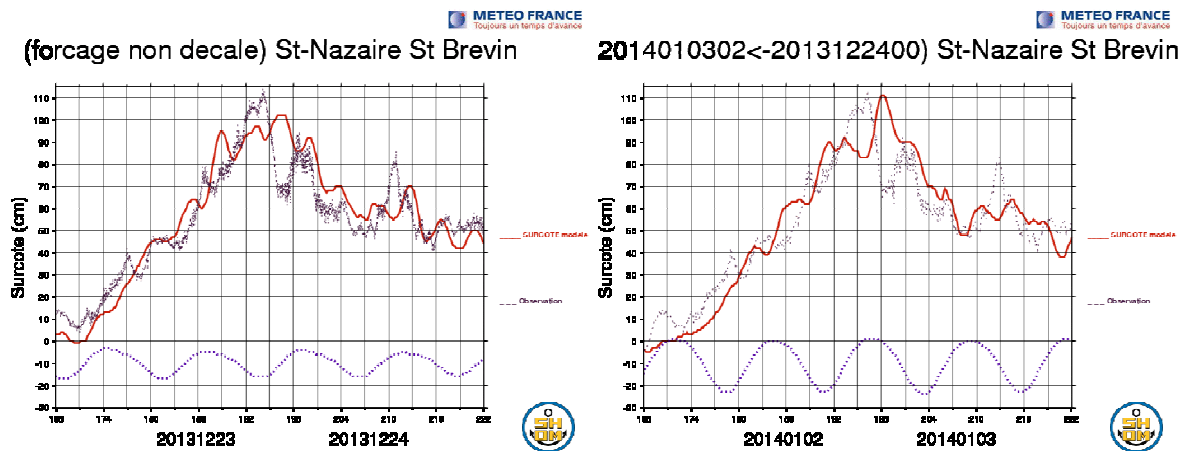
ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

- Cas du 15/10/1987 à **Brest** rejoué le 7/10/1987



Brest, simulation de surcotes HYCOM pour la tempête du 15/10/1987 pas de décalage à gauche (coefficient de 25), rejeu décalé le 07/10/1987 à droite (coefficient de 106)

- Cas du 23/12/2013 ("Dirk") à **Saint-Nazaire** rejoué le 03/01/2014

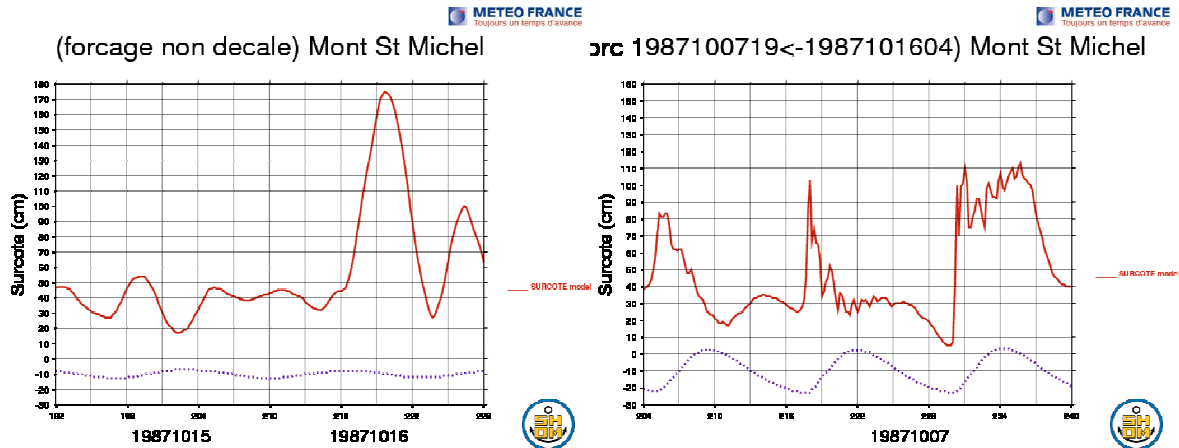


Saint-Nazaire, simulation de surcotes HYCOM pour la tempête du 23/12/2013 pas de décalage à gauche (coefficient de 58), rejeu décalé le 03/01/2014 (coefficient de 108)

Dans les deux cas présentés ci-dessus, les valeurs observées (courbes noires) ont été reproduites correctement par le modèle de surcote (courbes rouges).

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

- Cas du 15/10/1987 au **Mont-Saint-Michel** rejoué le 7/10/1987



Mont-Saint-Michel, simulation de surcotes HYCOM pour la tempête du 15/10/1987 pas de décalage à gauche (coefficient de 25), rejeu décalé le 07/10/1987 à droite (coefficient de 106)

Pour le Mont-Saint-Michel, aucune donnée observée n'était disponible pour valider le modèle sur cette zone très particulière. Les simulations du modèle semblent "douteuses".

Ces niveaux de surcote ajoutés à la hauteur d'eau de la pleine mer de la marée de vives eaux la plus proche ont donné des hauteurs totales d'eau très supérieures à la PHMA (Plus Haute Mer Astronomique). Exemples ci-dessous.

- Cas du 15/10/1987 à **Brest** rejoué le 7/10/1987

Dans l'état fictif de pleine mer à fort coefficient, le niveau marin obtenu a dépassé la PHMA de près de 90 cm...

SITE	PHMA (cm)	Surcote à la Pleine Mer (cm)	Hauteur totale d'eau à la Pleine Mer (marée + surcote) (cm)	Hauteur d'eau à la Pleine Mer sans surcote (valeur modèle) (cm)
Brest	793	144	882	738

- Cas du 23/12/2013 ("Dirk") à **Saint-Nazaire** rejoué le 03/01/2014

Le niveau marin obtenu a dépassé la PHMA de près de 70 cm...

SITE	PHMA (cm)	Surcote à la Pleine Mer (cm)	Hauteur totale d'eau à la Pleine Mer (marée + surcote) (cm)	Hauteur d'eau à la Pleine Mer sans surcote (valeur modèle) (cm)
Saint-Nazaire Saint-Brévin	659	92	717	625

5.4. Comparaison avec données de niveaux marins extrêmes SHOM

Les seules durées de retour de niveaux marins extrêmes disponibles sont calculées par le SHOM à partir de longues séries de référence : dans le tableau ci-après sont reportées ces valeurs calculées sur les ports disposant de séries de mesures marégraphiques suffisamment longues et complètes. Il ressort qu'en général le niveau centennal est d'environ 40 cm par rapport à la PHMA.

Site	ZH/ref IGN 69 (cm)	PHMA	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Le Havre	-437,8	856	882,8	890,8	898,8	909,8	918,8
Cherbourg	-328,5	715	722,5	728,5	734,5	742,5	748,5
Saint-Malo	-628,9	1355	1348,9	1355,9	1362,9	1371,9	1377,9
Roscoff	-476,4	980	989,4	995,4	1001,4	1009,4	1015,4
Le Conquet	-350,3	769	781,3	787,3	794,3	802,3	808,3
Brest	-363,5	793	805,5	812,5	818,5	827,5	833,5
Concarneau	-253,4	574	587,4	594,4	601,4	609,4	616,4
Port-Tudy	-273,8	586	601,8	608,8	615,8	624,8	631,8
Saint-Nazaire	-316	659	NR	NR	NR	NR	NR
Les Sables- d'Olonne	-283	593	617	624	631	640	647
La Rochelle	-350,3	686	704,3	711,3	719,3	728,3	735,3

Tableau des durées de retour des niveaux marins extrêmes en cm par rapport à la PHMA
(source SHOM).

Le niveau centennal théorique a donc été largement dépassé lors des expériences de décalage d'une tempête réelle par marée haute de vives eaux, exposées précédemment. Il n'est pas possible à ce stade d'associer une durée de retour aux expériences fictives réalisées. Cependant, les résultats obtenus nous amènent à nous interroger sur l'interprétation des références obtenues à l'aide des séries marégraphiques. Il semble que ces valeurs centennales puissent "facilement" être dépassées s'il y a conjonction entre le passage d'une tempête et la pleine mer de vives eaux. Dans le projet VIMERS-1, l'impact de l'ajout d'une hauteur d'eau supplémentaire due à la présence d'une houle et/ou du déferlement des vagues n'a pas été traité...

5.5. Conclusions de l'expérimentation

L'analyse des simulations sur les huit dates de référence rejouées par marée fictive a montré :

- qu'à chaque fois, le niveau de surcote était assez homogène en Bretagne Sud et Ouest, avec parfois une amplification dans certains estuaires ;
- que la surcote n'était pas amplifiée par fort coefficient (par rapport à la surcote par faible coefficient) pour les ports allant de Saint-Nazaire à Saint-Brieuc. C'est un des résultats majeurs de ces simulations ;
- que l'impact en Manche par vent violent de Nord-Est était faible (l'eau poussée vers la côte nord a tendance à s'évacuer ensuite vers le large par effet Coriolis) ;
- que l'impact en Manche par vent de Nord-Ouest violent était important, surtout sur la partie ouest correspondant au Trégor/Léon (toujours par effet Coriolis) ;
- que, par vent de Sud-Ouest, les zones situées à l'Est de Lorient subissaient un impact important du fait de la courbure de la côte ;
- que, pour la tempête "Dirk" (rejouée à la pleine mer avec un coefficient de 108 le 03 janvier 2014), celle du 25 février 1989 (rejouée à la pleine mer du 9 mars avec un coefficient de 116) et surtout celle du 15 octobre 1987 (rejouée le 7 octobre à la pleine mer avec un coefficient de 106), les valeurs de hauteurs d'eau totales (marée + surcote) dépassaient largement la PHMA (souvent de plus de 50 à 60 centimètres) et correspondaient à des périodes de retour très élevées ;
- que les résultats étaient moins clairs à l'Est de Saint-Brieuc. Il semble que les interactions marée-tempête y soient plus complexes. Par forte marée et tempête, un pic de surcote principal très important se produirait vers la mi marée montante ; un pic secondaire apparaîtrait à la pleine mer, il serait moins prononcé mais parfois significatif.

6. ANALYSE DE L'IMPACT D'ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES NON SURVENUS

La phase ultime du projet VIMERS-1 a consisté à tenter d'évaluer des vagues et niveaux marins extrêmes qui pourraient toucher les ports bretons. Pour cela, des tempêtes physiquement plausibles (mais non observées dans la période récente) ont été générées ; les vagues et niveaux marins associés ont été calculés en faisant passer ces tempêtes par pleine mer de vives eaux. Un rapport complet (rapport technique n° VII : surcotes et vagues extrêmes générées par des tempêtes fictives) décrivant les résultats de ces expériences est disponible, seuls quelques extraits sont présentés ici.

6.1. Rappel de la méthodologie PEARP

La PRévision d'Ensemble ARPEGE (nommée PEARP) est un système de prévision qui permet, à partir d'une situation donnée, de générer sur trois ou quatre jours trente-cinq évolutions de l'atmosphère différentes (mais équiprobables à la source). Pour cela, les conditions initiales et la physique du modèle sont modifiées de façon pertinente afin de balayer l'ensemble des horizons possibles.

Cette chaîne de prévision à trente-cinq membres est opérationnelle à Météo-France depuis fin 2009.

L'analyse des trente-cinq simulations (ou membres), et en particulier de leur dispersion, donne une indication sur la probabilité d'occurrence de l'événement. Les "membres" situés dans la moyenne ont finalement une probabilité d'occurrence plus importante que les "membres" extrêmes.

6.2. Méthode de sélection de trois "runs" extrêmes

Les prévisions PEARP sont relancées deux fois par jour : à 6 UTC, sur 72 heures, et à 18 UTC, sur 108 heures (35 "runs" sont disponibles à chaque lancement proposant un état de l'atmosphère toutes les 6 heures).

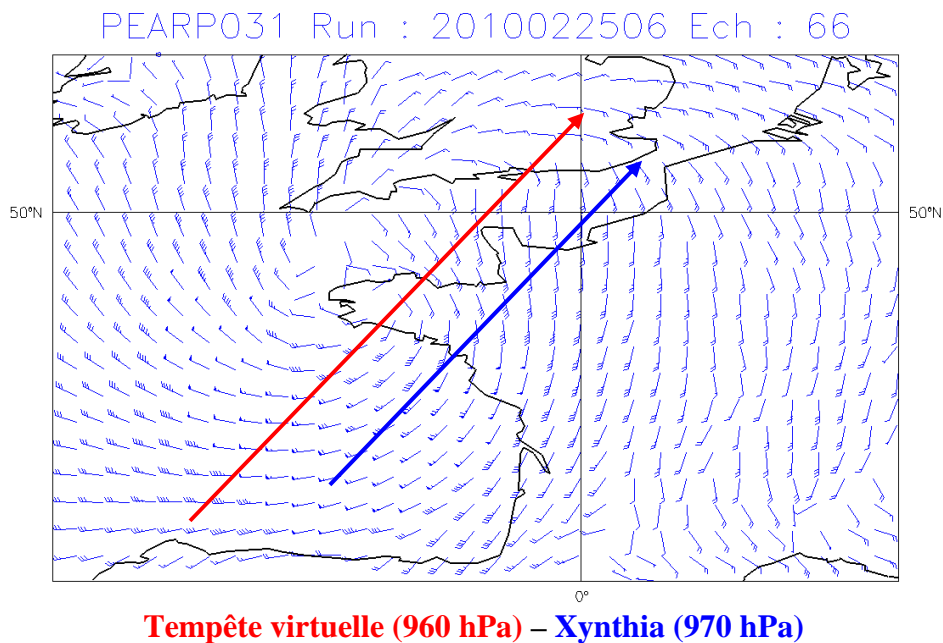
Compte tenu du volume de données disponibles que cela représentait, l'expérimentation s'est focalisée sur deux événements tempétueux ultérieurs à 2009 :

- l'épisode "Xynthia" du 28/02/2010 pour lequel la prévision déterministe était très bonne ;
- l'épisode du 16/12/2011 pour lequel la prévision déterministe donnait des scénarios extrêmes cinq jours à l'avance, avant de se rétracter vers un scénario de tempête plus habituelle deux jours avant l'événement.

L'analyse des "runs" de la PEARP à des échéances de prévision différentes s'est révélée, pour ces deux seuls événements, être un travail assez fastidieux. Celui-ci a permis de repérer trois simulations de tempêtes extrêmes (violentes et spatialement assez étendues).

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

- Les deux premières simulations ayant été sélectionnées concernent la tempête "Xynthia" : elles proposent des dépressions venant d'Espagne, comme la dépression réelle, mais plus creuses et circulant plus à l'ouest.
- La troisième simulation ayant été sélectionnée concerne la tempête du 16/12/2011 : elle propose une dépression très creuse circulant dans un flux d'Ouest et générant des vents d'Ouest violents en Manche ; en passant sur le sud de l'Angleterre à 12 UTC, le minimum de pression atteint sa valeur la plus basse de 950 hPa.
En réalité, la dépression est moins creuse et la valeur la plus basse (légèrement inférieure à 970 hPa) est observée sur Allemagne le 16/12/2011 à 12 UTC. La trajectoire, quant à elle, est à peu près identique.



Exemple de "Xynthia" rejouée par la PEARP "run" 31 du 25/02/2010 à 06 UTC, échéance 66 h.

Pour cet exemple, le centre dépressionnaire fictif est plus creux que la dépression réelle. Comme cette dernière, il circule du Sud-Ouest vers le Nord-Est, mais il est translaté plus à l'Ouest d'environ 100 km (il passe sur le Finistère).

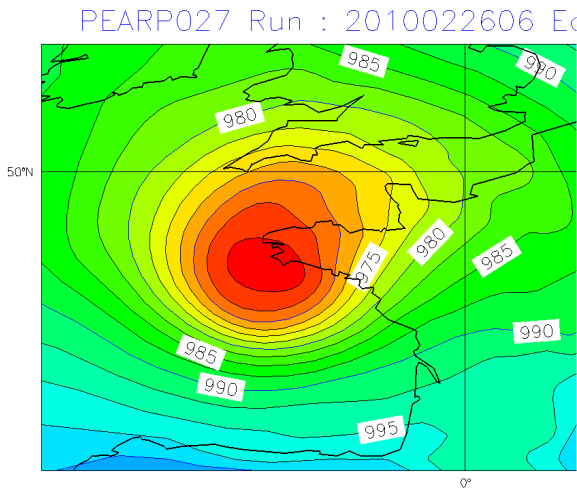
6.3. Analyse des résultats

Pour ces trois situations fictives, les vagues et les niveaux marins associés ont été calculés à l'aide des mêmes chaînes de calcul que celle utilisées dans les expériences précédentes (modèle MFWAM pour les vagues, HYCOM pour les niveaux marins). Pour augmenter l'impact en termes de niveaux marins, ces tempêtes extrêmes fictives ont été rejouées de façon à se caler au mieux au moment d'une pleine mer de vives eaux, la plus proche de la tempête fictive.

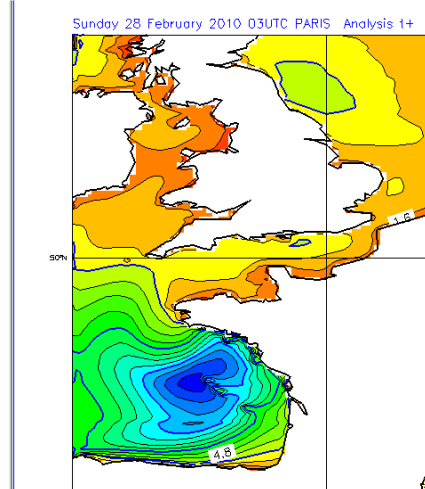
Les résultats obtenus en termes de hauteurs totales d'eau (marée + surcote) ont dépassé **très largement** les chiffres obtenus lors des expériences précédentes. De tels vents (60, voire 70, nœuds) soufflant sur une large étendue poussent des quantités d'eau très importantes vers les côtes.

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

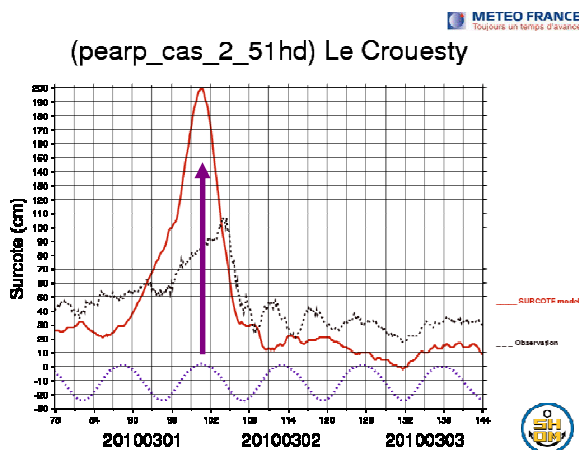
- Exemples de résultats obtenus pour l'épisode "Xynthia" à partir des simulations de la PEARP27, "run" 26/02/2010 à 06 UTC, échéance 42 heures



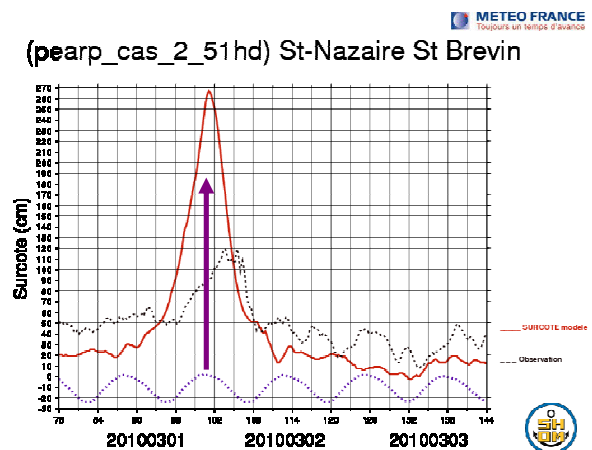
pression au niveau de la mer
pour le 28 février 2010 à 00 UTC
sortie PEARP "run" 2010022606, numéro 27



hauteur de la mer totale
pour le 28 février à 03 UTC
par le modèle MFWAM
à partir des champs de vent à 10 mètres de la
PEARP, "run" 2010022606, numéro 27



hauteur de surcote modélisée pour
Le Crouesty avec un décalage de +51 h



hauteur de surcote modélisée pour
Saint-Nazaire avec un décalage de +51 h

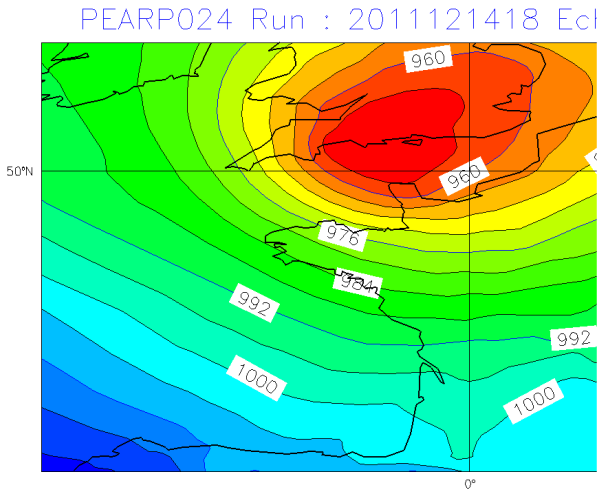
Les surcotes réelles associées à la tempête "Xynthia" ont atteint environ 1 mètre au Crouesty et à Saint-Nazaire (point noirs sur les courbes ci-dessus). Avec le "run" extrême utilisé ici, décalé pour faire coïncider les pics de surcotes avec la pleine mer de marée de vives eaux la plus proche (coefficient 116), ces derniers atteignent, respectivement 2 mètres et 2,5 mètres sur ces deux ports.

Les vagues générées par cette tempête virtuelle sont bien plus fortes que celles associées à la tempête réelle "Xynthia" et atteignent 8 à 9 mètres au large.

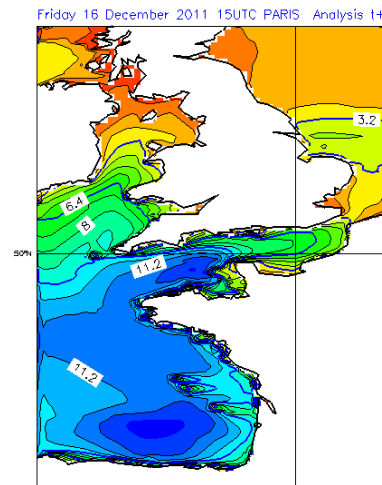
On n'ose imaginer l'impact à la côte de la conjonction de tels phénomènes...

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

- Exemples de résultats obtenus pour l'épisode du 16/12/2011 à partir des simulations de la PEARP24, "run" 14/12/2011 à 18 UTC, échéance 42 heures



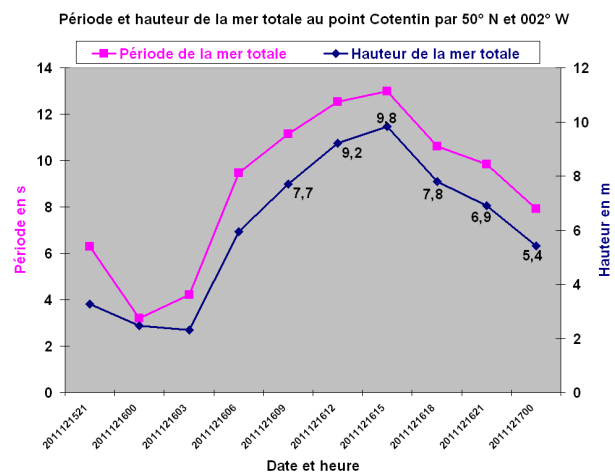
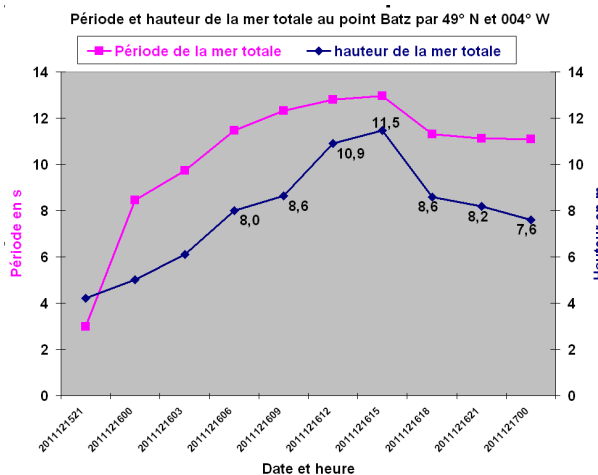
*pression au niveau de la mer
pour le 16 décembre 2011 à 12 UTC
sortie PEARP24, "run" 2011121418*

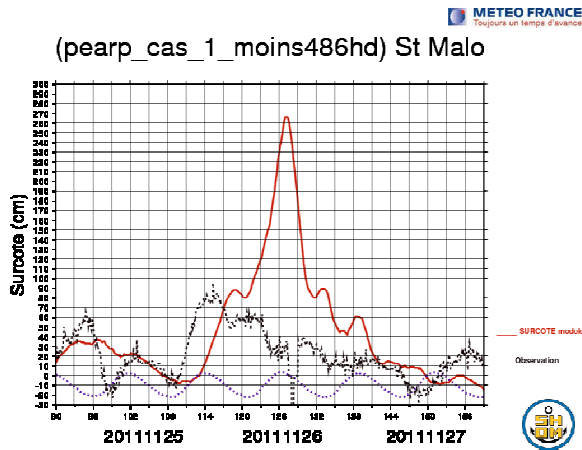


*hauteur de la mer totale
pour le 16 décembre à 15 UTC
par le modèle MFWAM
à partir des champs de vent à 10 mètres de la
PEARP24, "run" 2011121418*

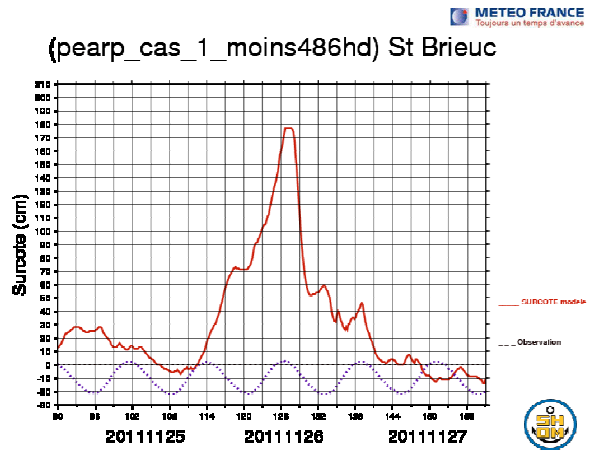
Pour cette situation fictive du 16/12/2011, une dépression 955 hPa longe le sud de l'Angleterre. Les côtes atlantiques sont moins impactées, par contre, le vent généré dépasse 60 nœuds sur l'Ouest de la Manche. Il lève des vagues énormes à 15 UTC (12 mètres d' H 1/3 à l'Ouest des îles anglo-normandes !).

Les graphiques ci-dessous présentent les prévisions de hauteur et de période de la mer totale entre le 15 décembre à 21 UTC et le 17 décembre 2011 à 00 UTC. Les valeurs maximales de hauteur H 1/3 culminent à 15 UTC : 11,50 mètres au Nord de l'île de Batz et 9,80 mètres au Nord du Cotentin, associées à des périodes de 12 secondes et de direction d'Ouest Sud-Ouest.





hauteur de surcote modélisée
pour *Saint-Malo*
avec un décalage de -486 h



hauteur de surcote modélisée
pour *Saint-Brieuc*
avec un décalage de -486 h

Au moment de la pleine mer, les surcotes associées à cet événement fictif atteignent 1,6 mètre à Saint-Brieuc et 2,5 mètres à Saint-Malo (!) dépassant respectivement la PHMA de 1 mètre et 1,5 mètre sur ces deux ports avec un coefficient de "seulement" 102.

Enfin, sur les trois tempêtes fictives étudiées, aucune n'a permis de générer des surcotes supérieures à celles observées le 15/10/1987 sur le Finistère (1,4 mètre à Brest) même si cette valeur a parfois été approchée sur le port de Brest lors de ces trois expériences.

6.4. Interprétation de ces résultats

Pour les trois simulations PEARP traitées, des niveaux de surcote extrêmes ont été atteints, ce qui n'avait pas été le cas lors de l'expérimentation traitant des calculs de surcote par forts coefficients (Cf. partie 5). Pour la quasi-totalité des ports du domaine VIMERS, la PHMA a été dépassée, parfois d'un à deux mètres, lorsque ces tempêtes fictives étaient décalées à une heure de pleine mer un jour de marée de vives eaux.

Même s'il faut interpréter ces résultats avec prudence (tests sur seulement trois cas), de tels niveaux marins extrêmes constituent déjà une information intéressante sur les records imaginables si de telles dépressions se produisaient dans de telles conditions de marée, sans même prendre en compte les conditions d'état de la mer.

En effet, l'impact à la côte serait d'autant plus important que ces forts niveaux marins seraient conjugués à de grosses vagues lors des trois situations fictives étudiées.

Il est impossible de confirmer ou non la possibilité de survenue de tels événements, fictifs mais paraissant physiquement réalistes, ni d'en calculer une durée de retour. On rappelle toutefois que dans l'histoire récente, au moins deux dépressions atteignant 950 hPa et générant des vents moyens de 70 nœuds ont circulé à proximité de la Bretagne, le 04/12/1896 et le 15/10/1987. Leur virulence était donc comparable aux événements fictifs étudiés ici avec des trajectoires cependant assez différentes.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce document résume les principaux résultats du projet VIMERS-1. Des éléments plus détaillés sont disponibles dans des rapports de validation listés en annexe.

On retiendra que la base des 150 tempêtes VIMERS, représentatives des tempêtes ayant touché la région Bretagne élargie, constitue une source d'informations homogène qui décrit l'ensemble des éléments associés à chaque événement. Cette base de connaissance a permis, grâce à une typologie explicitée dans VIMERS-0, de sélectionner 25 tempêtes de référence. Celles-ci ont fait l'objet de fiches tempêtes détaillées rédigées par le SHOM, le CEREMA et Météo-France (situation météorologique, surcotes, vagues, dégâts engendrés).

Les forçages météorologiques de ces 25 tempêtes ont été générés avec des modèles de dernière génération, ils ont été validés pour la très grande majorité d'entre elles. Ces champs de vent et de pression de référence ont été mis à disposition des partenaires afin de tester différentes chaînes de modélisation de niveaux marins et/ou vagues (celles de Météo-France ont commencé à l'être dans le cadre de ce projet VIMERS-1, mais celles des autres partenaires pourront également éventuellement l'être à l'avenir).

A l'issue de ce travail, des modélisations de vagues ont été réalisées pour certaines situations afin d'avoir des éléments chiffrés sur les vagues extrêmes pouvant se former au large de chaque portion du littoral breton.

Sur une sélection de huit situations météorologiques "réelles" du passé, des niveaux marins extrêmes ont été obtenus en obligeant ces tempêtes réelles à passer au moment d'une pleine mer de vives eaux. Pour certains événements, les résultats dépassent largement les hauteurs de niveau marin centennales, références calculées par le SHOM sur certains ports à l'aide de séries marégraphiques.

Enfin, l'utilisation des simulations d'ensemble PEARP a permis de disposer de trois jeux de données météorologiques, décrivant des situations extrêmes fictives mais relativement réalistes. A partir de ces trois jeux, certaines des pires conditions auxquelles la Bretagne pourrait être soumise lors de tempêtes ont pu être générées.

Le projet VIMERS-1 a donc rendu possibles l'accumulation et la mutualisation des connaissances sur la vulnérabilité de la Bretagne aux submersions marines.

A l'issue de cette phase du projet, quelques pistes se dégagent pour aller plus loin dans la prise en compte du risque submersion :

ETUDE DES TEMPÊTES MENACANT LE LITTORAL BRETON

- fournir de nouveaux jeux de forçages météorologiques validés sur des événements anciens, comme la tempête du 07/08/1948 ou celle du 08/01/1924, voire celle du 04/12/1896, en réalisant une descente d'échelle dynamique basée sur les ré-analyses du Centre Européen ERA-CLIM ;
- poursuivre la recherche des pires événements fictifs à l'aide de l'archive très riche constituée des prévisions d'ensemble PEARP ;
- analyser de nouveaux événements anciens (dans ce domaine, le recensement n'est jamais exhaustif et donc de nouveaux événements du passé restent à découvrir et à documenter) ;
- lancer de nouvelles simulations de vagues (à échelle fine avec le modèle WW3) et de surcotes (à l'aide du modèle HYCOM) pour évaluer leur impact à la côte ;
- réfléchir avec les partenaires sur une nouvelle méthode permettant d'estimer des durées de retour de phénomènes extrêmes conjugués (forte marée+vagues et/ou surcote) ;
- tester de nouveaux paramètres qui permettraient d'améliorer la classification des tempêtes réalisée dans VIMERS-1 ;
- caractériser tout événement tempétueux à venir ces prochaines années et l'intégrer dans la base de connaissances VIMERS.

RAPPORTS TECHNIQUES COMPLEMENTAIRES

rapport technique n° I : tests sur les tempêtes analogues

rapport technique n° II : validation météorologique des rejeux des vingt-cinq situations de référence

rapport technique n° III : utilité de la PEARP

rapport technique n° IV : simulation de vagues

rapport technique n° V : occurrence tempête et grande marée

rapport technique n° VI : calcul de surcotes fictives avec décalage de la marée

rapport technique n° VII : surcotes et vagues extrêmes générées par des tempêtes fictives

GLOSSAIRE

CEREMA : Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques, Maritimes Et Fluviales, englobé dans le CEREMA en janvier 2014-09-18

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Bretagne

ECMWF : European Center for Medium range Weather Forecasting (en français, CEPTM Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme)

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational

ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle, modèle de prévision numérique planétaire pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France

HYCOM : **H**ybrid **C**oordinate **O**cean **M**odel

MFWAM Météo_France Wave model

PEARP : Prévision d'Ensemble ARPège

BQE Bulletin Quotidien d'Etudes

ERA Interim : ré-analyses du ECMWF disponibles depuis 1979 à résolution temporelle de 6 heures et à résolution spatiale de 50 kilomètres

HOMONIM : **H**istorique **O**bservation **M**odélisation des **N**iveaux **M**arins

PHMA : Plus Haute Mer Astronomique (coefficient 120)

Rejeu : simulation d'un événement passé avec les modèles d'aujourd'hui pour décrire ses éléments météorologiques dans le temps et dans l'espace.