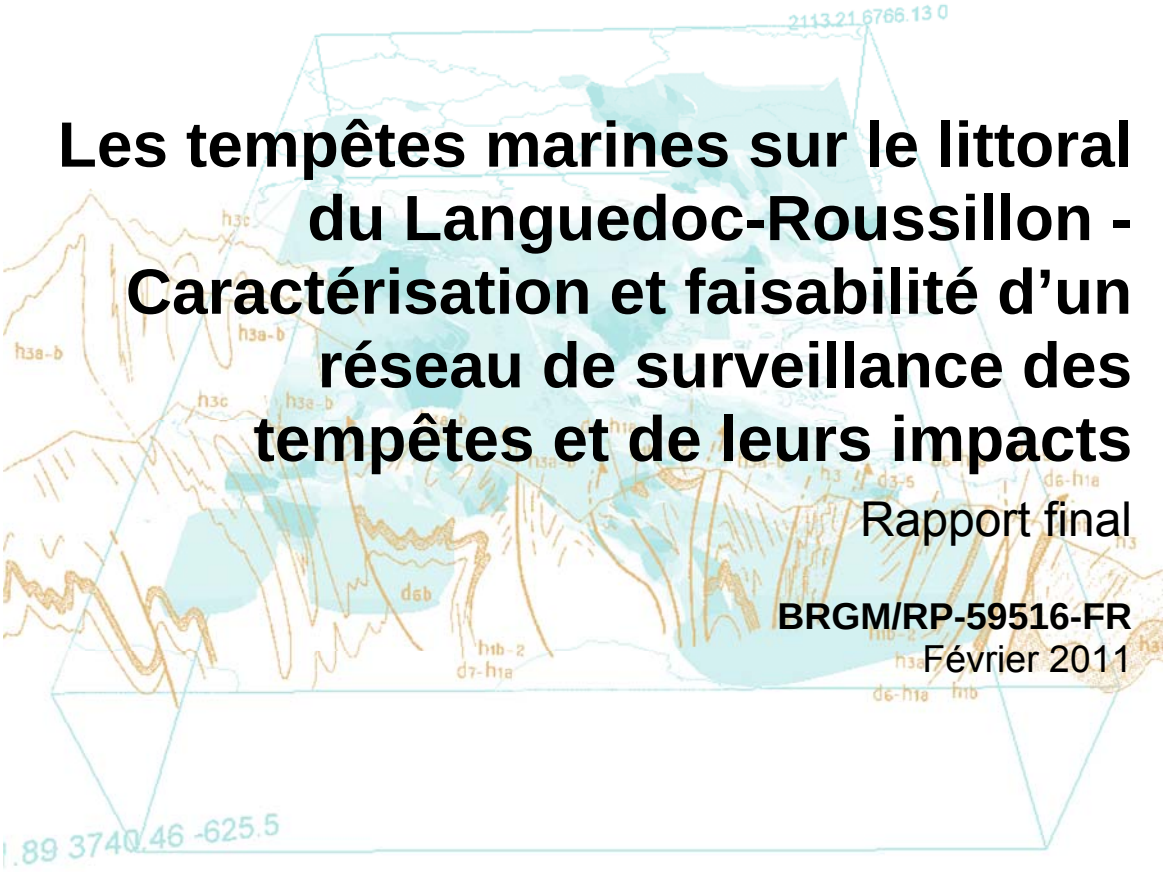
Document public



Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon - Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts

Rapport final

BRGM/RP-59516-FR
Février 2011

la Région Languedoc Roussillon

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PREFET DE LA REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon - Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts

Rapport final

BRGM-59516-FR
Février 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010

Y. BALOUIN ; Y. DE LA TORRE et E. TIRARD

Vérificateur :	**Approbateur :**
Alexis STEPANIAN	Marc AUDIBERT

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

la Région Languedoc Roussillon

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PREFET DE LA REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : acteurs, déclenchement, Languedoc-Roussillon, procédure, réseau, seuil, suivi, surveillance, tempêtes.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
BALOUIN Y. ; DE LA TORRE Y. et TIRARD E. (2011) – Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon – Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts. Rapport BRGM/RP-59516-FR ; 65 p.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des « Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du volet « Gérer durablement le littoral » du Contrat de Projet Etat-Région 2007-20013 du Languedoc-Roussillon.

Cette étude, cofinancée par l'Etat, la Région Languedoc-Roussillon et la dotation de Service Public du BRGM, concerne l'action 3 « Réseau de surveillance tempêtes » du Module 1 « Développement et partage de la connaissance ».

Elle s'attache à ce titre à la faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes dans le but d'améliorer la compréhension de ces phénomènes météo-marins qui mettent en péril de vastes zones côtières du Languedoc-Roussillon.

La méthodologie mise en œuvre permet en premier lieu de caractériser les tempêtes marines dans le Golfe du Lion (flux de Sud-Est et d'Est) et de déterminer, en fonction du critère de hauteur de vague, les seuils morphogènes et seuils d'impacts suivants :

- Hs = 3m : mobilité de morphologies et inondation partielle de la plage ;
- Hs = 4m : inondation de la plage et érosion du front dunaire ;
- Hs ≥ 5m : franchissement dans les zones basses faisant face à la houle.

Dans un second temps, et à partir d'exemples internationaux et nationaux, la faisabilité d'un réseau de suivi des tempêtes est étudiée. Les acteurs régionaux du littoral ont pour cela été consultés sur leurs initiatives propres (suivis Etat ; EID ; Conseil Général de l'Hérault ; ports régionaux ; Agglomérations,…) et une première liste d'intervenants est définie.

Sur la base des démarches existantes, un dispositif de suivi homogène des tempêtes est proposé à l'échelle régionale. Il s'appuie sur la collecte d'indicateurs selon des méthodes de suivi et une procédure distinguant trois types d'intervention selon les seuils de déclenchement :

- Seuil 1 (Hs= 3m) : « suivi léger » avec collecte des enregistrements de réseaux de mesures (stations météorologiques, houlographes, marégraphe, stations vidéo) ;
- Seuil 2 (Hs =4m) : « suivi amélioré » avec en sus des indicateurs de seuil 1, une collecte rapide d'observations de terrain (formulaire de terrain, photos dites de « points fixes » et points GPS « à main ») ;
- Seuil 3 (Hs ≥ 5m) : « suivi complet » avec en sus des indicateurs de seuil 2 une collecte de sorties de modèle de surcote et de houle et des levés de terrain

complémentaires (photographies aériennes obliques géoréférencées et levés topobathymétriques).

Le passage à un réseau opérationnel pourra se faire en automatisant d'une part l'activation du réseau par un mèl à destination des intervenants en se basant sur les sorties du modèle Previmer en différents points du Golfe du Lion et en coordonnant d'autre part, l'action de différents participants ; la mutualisation et la valorisation des observations à l'échelle régionale.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Caractérisation des tempêtes dans le Golfe du Lion 11

2.1. PRESENTATION DU PHENOMENE 11
2.1.1. Contexte climatique 13
2.1.2. Impacts morphologiques liés aux tempêtes 16
2.1.3. Impacts socio-économiques 18

2.2. METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES 20
2.2.1. Données issues des bouées 20
2.2.2. Données issues de la modélisation numérique 20
2.2.3. Données issues de la BD_tempêtes 24
2.2.4. Données topographiques 25

2.3. RECONSTITUTIONS DES SERIES TEMPORELLES DE VAGUES AVEC LE MODELE SWAN 26
2.3.1. Calibration des simulations avec le vent CFSR 26
2.3.2. Comparaison des modèles SWAN NCEP et CFSR 28

2.4. LES TEMPETES DANS LE GOLFE DU LION DEPUIS 1979 29
2.4.1. Analyse statistique des tempêtes sur l'ensemble du Languedoc-Roussillon 30
2.4.2. Analyse des caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes sur le Languedoc-Roussillon 32

2.5. LES IMPACTS DES TEMPETES ET SEUILS D'IMPACTS 37

2.6. OUTILS DE PREVISION DES TEMPETES 39
2.6.1. Modèles opérationnels de prévision du vent 39
2.6.2. Modèles opérationnels de prévision de la houle 40
2.6.3. Bulletin d'alerte de Météo-France 42

3. Faisabilité d'un réseau de suivi des tempêtes et de leurs impacts 45

3.1. UN EXEMPLE D'ORGANISATION EN RESEAU : LE PLAN NATIONAL AMERICAIN POUR L'EVALUATION DES IMPACTS DES DESASTRES NATURELS 45
3.1.1. Contexte 45
3.1.2. Participants 46

3.1.3. Critères d'activation du plan 46
3.1.4. Procédures de réponses 47
3.1.5. Récupération et mutualisation des données 48
3.1.6. Synthèse de l'exemple américain 48
3.1.7. Autres exemples en Europe 49

3.2. RECENSEMENT DE L'EXISTANT EN LANGUEDOC-ROUSSILLON 49
3.2.1. Organismes consultés 50
3.2.2. Dispositifs existants 50
3.2.3. Apports et limites 53
3.2.4. Autres dispositifs 54

3.3. DISPOSITIF DE DECLENCHEMENT DU SUIVI 54

3.4. INDICATEURS ET METHODES DE SUIVI 55
3.4.1. Indicateurs à prendre en compte 55
3.4.2. Méthodes de suivi 57

3.5. PROCEDURE DE SURVEILLANCE DES TEMPETES EN LANGUEDOC-ROUSSILLON 61
3.5.1. Réseau d'acteur susceptible de réaliser le suivi 61
3.5.2. Proposition de procédure 61

4. Conclusion 63

Bibliographie 65

Liste des illustrations

Illustration 1 : Echelle de Beaufort (1805). 12

Illustration 2 : Tableau récapitulatif des différents types de tempêtes marines rencontrés dans le Golfe du Lion. 13

Illustration 3 : Situation météorologique du 07 novembre 1982 (source : www.wetterzentrale.de). 14

Illustration 4 : Situation météorologique du 26 décembre 2008 (source : www.wetterzentrale.de). 15

Illustration 5 : Conditions météorologiques lors d'épisodes cévenols (source : Météo France). 16

Illustration 6 : Erosion du cordon dunaire lors de la tempête de décembre 2003 (à gauche) ; franchissement sur le lido à l'Est de d'Agde lors de la tempête de décembre

2002 (à droite) ; submersion marine sur le lido de Sète à Marseillan lors de la tempête de novembre 1982. 16

Illustration 7 : Caractéristiques morphodynamiques des impacts liés aux tempêtes (source : Sallenger, 2000). 17

Illustration 8 : Ensablement d'une villa (à gauche) et destruction (à droite) sur la plage du Racou (Argelès-sur-Mer) lors de la tempête de décembre 1997. 19

Illustration 9 : Destruction totale de la Digue de Cerbère après la tempête de décembre 2008 (à gauche) et destruction de la RN 112 de Sète à Marseillan après la tempête de décembre 1997 19

Illustration 10 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des houlographes du Golfe du Lion. 20

Illustration 11 : Présentation de la méthode d'exploitation des données par modélisation. 22

Illustration 12 : Représentation de l'emprise des modèles SWAN Rang1 et Rang 2. 23

Illustration 13 : Comparaisons des hauteurs significatives de la houle entre les données observées au niveau des 4 houlographes du Golfe du Lion et les données modélisées pour les tempêtes récentes. 27

Illustration 14 : Comparaison des directions de pic de la houle entre les données observées au niveau des 4 houlographes du Golfe du Lion et les données modélisées pour les tempêtes récentes. 28

Illustration 15 : Comparaison des résultats obtenus à partir des différentes modélisations. 29

Illustration 16 : Analyse statistique des tempêtes modélisées sur l'ensemble du Golfe du Lion. 30

Illustration 17 : Saisonnalite des tempêtes majeures sur l'ensemble du Languedoc-Roussillon et nombre d'événements par hiver depuis 1979 (échantillon de 46 événements majeurs). 31

Illustration 18-a : Caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes au niveau des points Espiguette et Sète. 33

Illustration 19 : Représentation des directions moyennes des houles de tempêtes aux points Espiguette, Sète et Gruissan. 35

Illustration 20 : Représentation des directions moyennes de la houle sur chacun des sites d'étude. 36

Illustration 21 – Dégats observés sur le littoral héraultais en fonction de la hauteur significative de la houle (d'après Gervais et al., 2011). 38

Illustration 22 – Impacts observés sur le littoral du Roussillon en fonction de l'intensité des tempêtes. 38

Illustration 23 – Modèles de prévision des vents pour la méditerranée occidentale. 40

Illustration 24 – Comparaison entre les hauteurs significatives des vagues simulées/mesurées (au niveau de la bouée 34004 au large de Sète). 41

Illustration 25 – Comparaison des hauteurs significatives prédites par le modèles WW3-Méditerranée et mesurées à la bouéee 34004 au large de Sète (coups de mer de l'année 2009). 42

Illustration 26 - critères d'activation du plan d'évaluation des impacts..... 47
Illustration 27 – Procédures de réponse du Plan d'évaluation des impacts..... 48
Illustration 28 – Dispositif de surveillance des tempêtes DREAL / DML 51
Illustration 29 – Dispositif de surveillance des tempêtes de l'EID 52
Illustration 30 – Synthèse des indicateurs à suivre lors d'une tempête 56
Illustration 31 – Synthèse des méthodes de suivis des tempêtes..... 57
Illustration 32 – Procédure de suivi de tempête 62

Liste des annexes

Annexe 1 Illustration des dégats occasionnés lors de la tempête de décembre 1997 67
Annexe 2 Présentation des évènements de tempêtes recensés dans la base de données tempêtes et modélisés avec le modèle SWAN (CFSR) 71
Annexe 3 Formulaire d'observations de terrain..... 75

1. Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des « Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du volet « Gérer durablement le littoral » du Contrat de Projet Etat-Région 2007-20013 du Languedoc-Roussillon.

Cette étude, cofinancée par l'Etat, la Région Languedoc-Roussillon et la dotation de Service Public du BRGM, concerne l'action 3 « Réseau de surveillance tempêtes » du Module 1 « Développement et partage de la connaissance ».

Elle s'attache à ce titre à la faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes dans le but d'améliorer la compréhension de ces phénomènes météo-marins qui mettent en péril de vastes zones côtières du Languedoc-Roussillon.

Le rapport présente l'état des connaissances sur les tempêtes marines affectant le littoral du Golfe du Lion, les caractéristiques physiques de ces événements (notamment la houle) et les seuils d'impact connus ou estimés. Les outils permettant d'anticiper ces événements (modèles météorologiques et océanographiques) sont présentés et évalués.

Enfin, les dispositifs de suivis des tempêtes et de leurs impacts sont présentés, ainsi que les démarches existant dans la région Languedoc-Roussillon. Le rapport présente pour cela les dispositifs existants et propose sur cette base des indicateurs et méthodes de suivi homogénéisés à l'échelle régionale ainsi que les acteurs susceptibles de les réaliser.

2. Caractérisation des tempêtes dans le Golfe du Lion

2.1. PRESENTATION DU PHENOMENE

Chaque année, le littoral du Golfe du Lion est soumis à plusieurs épisodes de tempêtes marines, qui occasionnent des impacts plus ou moins importants sur la côte.

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour définir une tempête marine. Elles sont basées respectivement sur les forçages (vitesse du vent, hauteur de la houle, hauteur de la surcote) ou sur les impacts, qu'ils soient physiques (érosion, submersion) ou socio-économiques (coûts des dommages, coûts de reconstruction, …).

L'échelle inventée par Francis Beaufort (1774-1857) est basée sur la force des vents. Elle présente l'avantage de pouvoir être utilisée par quiconque sans nécessiter de mesures sur le terrain.

Force	Effet sur terre	Effet sur mer	Appellation - sur terre - sur mer	Hauteur des vagues (m)	Vitesse du vent (nœuds)	Vitesse du vent (km/h)
0	La fumée des cheminées s'élève verticalement	La mer est comme un miroir	vent calme mer calme	0	<1	<1
1	La fumée donne la direction du vent mais pas les Girouettes	Rides comme des écailles de poisson	Très légère brise Mer ridée	0,1	1-3	1-5
2	Les girouettes tournent, sensation de vents sur le visage	Vagues courtes qui ne déferlent pas	Légère brise Mer ridée	0,2-0,3	4-6	6-11
3	Les feuilles sont constamment agitées, les drapeaux légers sont déployés	Très petites vagues	Petite brise Mer belle	0,6-1,0	7-10	12-19
4	Le vent soulève la poussière, les petites branches sont agitées	Petites vagues, les moutons sont nombreux	Jolie brise Mer peu agitée	1,0-1,5	11-16	2-28
5	Les arbustes en feuilles commencent à se balancer	Vagues modérées, nombreux moutons, petites vagues sur les eaux intérieures	Bonne brise Mer agitée	2,0-2,5	17-21	29-38
6	Les grandes branches sont agitées, les fils électriques sifflent, l'utilisation du parapluie est difficile	Des lames commencent à se former, les crêtes d'écume blanche sont plus étendues	Vent frais Mer forte	3,0-4,0	22-27	39-49

Force	Effet sur terre	Effet sur mer	Appellation - sur terre - sur mer	Hauteur des vagues (m)	Vitesse du vent (nœuds)	Vitesse du vent (km/h)
7	Les arbres en entier sont agités, marcher contre le vent devient difficile	L'écume blanche provenant des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées	Grand frais Mer très forte	4,0-5,5	28-33	50-61
8	Le vent casse les petites branches, marcher contre le vent est pénible	Tourbillons d'embruns qui se détachent des crêtes des lames	Coup de vent Mer très forte	5,5-7,5	34-40	62-74
9	Le vent fait de légers dommages aux habitations	Grosses lames, épaisses traînées d'écume, visibilité réduite par les embruns	Fort coup de vent Mer grosse	7,0-10,0	41-47	75-88
10	Arbres déracinés, dommages importants aux habitations	Très grosses lames, la mer est blanche, visibilité réduite	Tempête Mer très grosse	9,0-12,5	48-55	89-102
11	Dommages très étendus	Lames exceptionnellement haute, visibilité très réduite	Violente tempête Mer très grosse	11,5-16,0	56-63	102-117
12	Dévastation	L'air est plein d'écume et d'embruns, la visibilité est nulle	Ouragan Mer énorme	+14	+64	+118

Illustration 1 : Echelle de Beaufort (1805).

Selon cette échelle, la tempête résulte d'une violente perturbation atmosphérique entraînant des vents moyens à forts, en général accompagnés de fortes pluies et d'orages. Le régime de tempête débute généralement pour des forces 7 à 8, synonymes de vents forts et de mer très forte.

Une tempête marine est généralement définie comme un évènement pour lequel la hauteur des vagues dépasse un seuil déterminé en fonction des caractéristiques locales durant un intervalle de temps assez long (Mendoza, 2008).

La plupart des tempêtes qui affectent la région du Languedoc-Roussillon génèrent des vagues dont la hauteur significative est de l'ordre de 3 mètres. Cependant, lors d'évènements extrêmes, ces valeurs peuvent être largement dépassées et le cordon littoral séparant la mer de la lagune peut être franchi par les vagues soit de manière temporaire au pic de la tempête soit de manière continue pendant l'intégralité de la tempête. Ce fut par exemple le cas lors des tempêtes extrêmes de novembre 1982 et de décembre 1997 où la hauteur significative des vagues a atteint des valeurs de 7 mètres au large de Sète. La tempête de 1997, d'occurrence cinquantennale a notamment provoqué des dommages importants sur l'ensemble du littoral régional tant sur les espaces naturels que sur les zones urbanisées (Annexe 1).

2.1.1. Contexte climatique

D'un point de vue météorologique, une tempête marine correspond à l'évolution d'une perturbation atmosphérique pouvant s'étendre sur une largeur atteignant les 200 kilomètres. Cette perturbation est issue de la confrontation de deux masses d'air aux caractéristiques bien distinctes en termes de température ou d'humidité. Cette confrontation engendre alors un gradient de pression élevé, à l'origine de vents violents et le plus souvent de précipitations intenses.

Le Golfe du Lion est soumis à un climat de type méditerranéen tant par sa position géographique que par la présence de la mer. Cependant, la méditerranée occidentale constitue un des secteurs de cyclogenèse active du bassin méditerranéen, ce qui explique que le littoral Languedocien ne soit pas exempt des phénomènes violents que sont les tempêtes marines (Tabeaud, 1995). Globalement, la saison estivale, de mai à septembre, constitue la phase habituelle de rémission des tempêtes compte tenu du caractère anticyclonique du champ de pression. Quelques évènements tempétueux peuvent toutefois survenir plusieurs fois par décennie et le plus souvent avec violence. C'est en hiver que les tempêtes sont les plus nombreuses en raison d'un champ de pression beaucoup plus dépressionnaire à cette saison.

Dans tous les cas, les épisodes de tempêtes interviennent en fonction de conditions aérologiques à grande échelle déterminant la direction des vents et de la houle. Leur origine peut être variable et on distingue dans le Golfe du Lion 3 différents types de tempêtes (Cf. Illustration 2) :

	Vents	Houle	Exemples	Caractéristiques
Tempêtes de Sud-Sud-Est	Sud-Est	Sud-Est	Novembre 1982 Décembre 1997	Dépression centrée sur le Golfe de Gascogne couplée à un anticyclone en Europe Centrale
Tempêtes d'Est	Nord-Est	Est	Décembre 2008	Système dépressionnaire sur les Baléares Vaste anticyclone sur la Sibérie
	Est à Sud-Est	Est	Novembre 1999	Dépression sur les Baléares couplées à un anticyclone sur l'Irlande
Tempêtes liées à des épisodes cévenoles	Sud à Sud-Est	Sud à Sud-Est	Décembre 2003 Octobre 2009	Dépression centrée sur l'Atlantique Flux de Sud accompagné de fortes pluies

Illustration 2 : Tableau récapitulatif des différents types de tempêtes marines rencontrés dans le Golfe du Lion.

Tempête de Sud-Sud-Est

Ce type de tempête associe le plus généralement de hautes pressions sur la Scandinavie et les Balkans dirigeant vers l'Italie un air froid continental et la venue en Méditerranée occidentale d'une perturbation ayant traversé la péninsule ibérique (Tabeaud, 1995).

On peut citer comme exemple les tempêtes du 06 au 11/11/1982 et du 16 au 18/12/1997 qui ont balayé la région du Languedoc-Roussillon et qui firent de nombreux dégâts. Ces deux tempêtes, parmi les plus fortes et destructrices de ces 50 dernières années, présentent en effet des caractéristiques similaires à savoir u**ne forte dépression centrée entre le Golfe de Gascogne et les îles britanniques associée à un anticyclone en Europe centrale** (Cf. illustration 3).

Cette situation météorologique génère un fort gradient zonal et à une circulation atmosphérique rapide de secteur Sud dans le Golfe du Lion entrainant des **vents** et une **houle de secteur Sud-Est** (Ullmann, 2008).

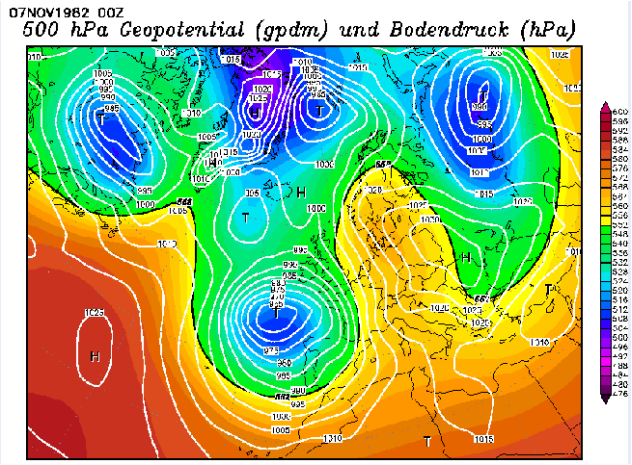


Illustration 3 : Situation météorologique du 07 novembre 1982 (source : www.wetterzentrale.de).

Tempêtes d'Est

Les tempêtes d'Est associent le plus généralement un **système dépressionnaire centré sur les Baléares à un anticyclone centré sur le Nord de l'Europe.** Ce type de conditions météorologiques génère des conditions de vents et de houle d'Est qui affectent particulièrement la partie sud du Golfe du Lion dont le littoral est globalement orienté Nord-Sud (littoral de l'Aude et des Pyrénées orientales.

On peut citer comme exemples la tempête de novembre 1999 ainsi que celle des 26 au 28 décembre 2008 (Cf. illustration 4).

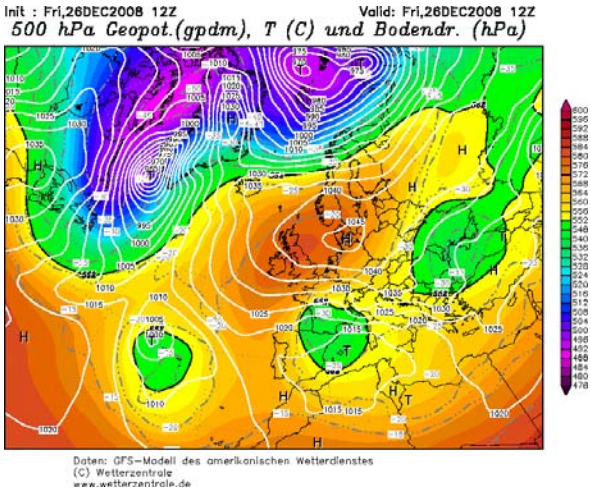


Illustration 4 : Situation météorologique du 26 décembre 2008 (source : www.wetterzentrale.de).

Tempêtes liées à des épisodes cévenols

Les épisodes cévenols sont des phénomènes météorologiques naturels, à cinétique rapide, caractéristiques du secteur méditerranéen qui s'identifient par des pluies intenses et durables. Ces pluies surviennent généralement au début de l'automne lorsque l'eau de la mer méditerranée est encore chaude et se produisent par **vents de Sud à Sud-Est** sur les reliefs des Cévennes.

Ces phénomènes sont la résultante de conditions météorologiques bien particulières. Ils sont en effet liés à la présence d'une **dépression sur l'Atlantique** ou le proche Atlantique qui va générer des **flux de Sud** permettant à l'air chaud et humide qui s'évapore de la mer méditerranée de remonter vers le nord (Cf. illustration 5). Cependant, cette masse d'air ne peut s'élever très haut dans l'atmosphère car elle est bloquée par une autre masse d'air sèche. Elle va remonter vers le Nord jusqu'à être bloquée par les premiers reliefs montagneux que sont les Cévennes. Ces derniers redirigent alors la masse d'air en hauteur jusqu'à ce qu'elle atteigne la tropopause. La masse d'air s'y étale et forme des nuages fortement chargés en eaux et en énergie qui vont entraîner des pluies orogéniques sur un espace très réduit.

Les tempêtes marines liées à ce type d'évènement sont généralement de faible intensité mais les impacts générés sur le littoral peuvent être amplifiés par les fortes précipitations qui vont entraîner des phénomènes de **bouchons marins**. La concomitance de niveaux de surcote importants générés par les vents de SSE et de forts débits aux embouchures accentue le risque de débordement fluviatile et de hauts niveaux dans les lagunes

On peut citer comme exemple la tempête d'octobre 2009 ou de décembre 2003.

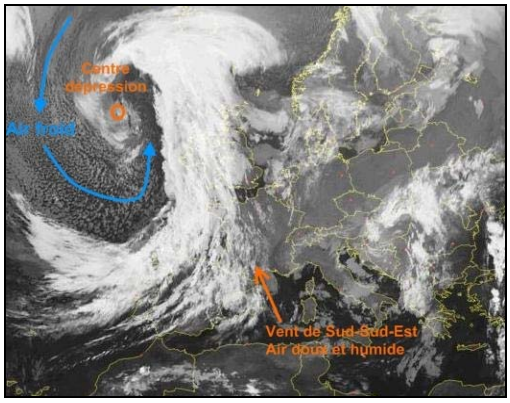


Illustration 5 : Conditions météorologiques lors d'épisodes cévenols (source : Météo France).

2.1.2. Impacts morphologiques liés aux tempêtes

En fonction des conditions climatiques initiales et du secteur concerné, les phénomènes de tempêtes marines peuvent induire de nombreux impacts morphologiques sur le littoral ainsi qu'une évolution plus ou moins importante du profil de plage selon leur intensité. Parmi ces impacts, on peut observer l'érosion de la plage et du cordon dunaire, les phénomènes de franchissement (*overwash*) ainsi que la submersion des zones côtières basses (cf. Illustration 6).

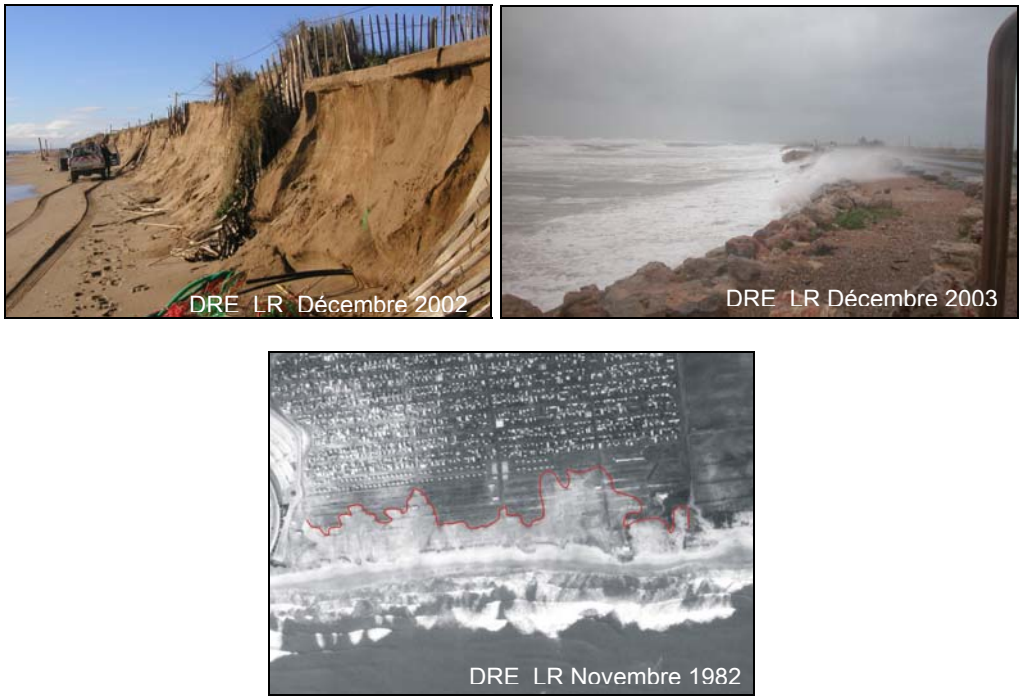


Illustration 6 : Erosion du cordon dunaire lors de la tempête de décembre 2003 (à gauche) ; franchissement sur le lido à l'Est de d'Agde lors de la tempête de décembre 2002 (à droite) ; submersion marine sur le lido de Sète à Marseillan lors de la tempête de novembre 1982.

Les impacts morphologiques lors d'épisodes tempétueux ne sont néanmoins pas uniquement dépendants des caractéristiques de la tempête telles la hauteur des vagues ou la surcote. La morphologie du cordon dunaire ainsi que son élévation constituent également des paramètres majeurs. Le cordon littoral représente à cet égard la première ligne de défense naturelle. En effet, il est évident que des portions de littoral ne présentant pas de dunes ou des dunes faiblement développées seront plus vulnérables à la submersion que des portions de littoral présentant des dunes évoluées.

Certains modèles, notamment celui de Sallenger (2000), permettent de définir des régimes d'impacts différents en fonction da la hauteur maximale atteinte par le niveau d'eau lors de la tempête.

Grâce à ce modèle, quatre degrés d'impacts peuvent être déterminés (Cf. illustration 7) :

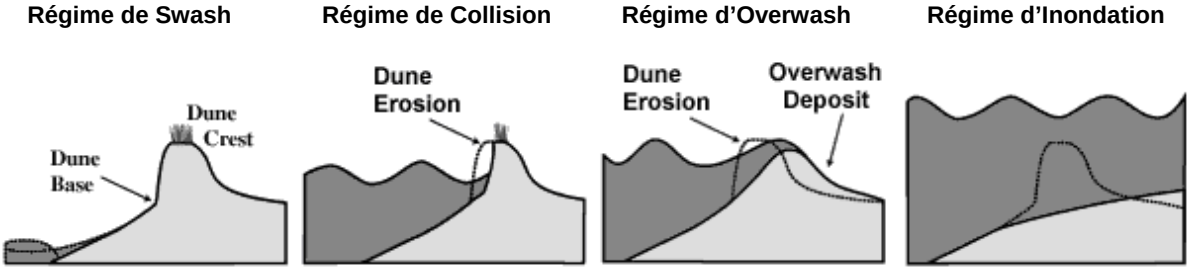


Illustration 7 : Caractéristiques morphodynamiques des impacts liés aux tempêtes (source : Sallenger, 2000).

Le régime de Jet de rive (Swash)

Ce régime est caractéristique de faibles tempêtes. En effet, dans ce cas, le niveau d'eau induit par la tempête reste inférieur à la hauteur du pied de dune. De ce fait, on peut alors observer une faible érosion de la plage. Toutefois, pendant les mois suivants la tempête, la faible quantité de sables érodés retournera de façon naturelle vers la plage.

Le régime de collision

Dans ce cas, le niveau d'eau induit par la tempête dépasse le pied de dune mais reste inférieur à son sommet. Les vagues entrent donc en collision avec les dunes et provoquent leur érosion ainsi qu'un éventuel recul du trait de côte. L'érosion progressive du cordon dunaire par le vent et la houle lors d'épisodes de tempêtes peut favoriser l'apparition de brèches et augmenter l'influence des impacts liés aux tempêtes.

Les régimes de submersion

Les cordons dunaires peuvent être submergés de façon plus ou moins permanente lors de certains épisodes de tempête lorsque le niveau d'eau induit est important. On distingue alors deux types de submersion.

- **Le régime d'Overwash (submersion temporaire):**

Dans cette situation, la hauteur d'eau atteinte est supérieure au sommet de la dune et l'ensemble du cordon dunaire est submergé momentanément. Cette submersion provoque ainsi un déplacement de sable depuis le large vers l'intérieur des terres. Ce phénomène, appelé « *roll-over* » contribue à la migration globale de la dune en particulier lorsqu'il est précédé d'une phase d'érosion intense du cordon dunaire par les vagues.

- **Le régime d'Inondation (submersion permanente):**

Ce phénomène se produit lorsque le niveau moyen de la mer ainsi que le *Set-up* des vagues lors d'une tempête sont plus hauts que la dune. Le *Set-up* correspond à une remontée locale du niveau de la mer sous l'effet du déferlement.

Dans cette hypothèse, l'ensemble du cordon littoral ainsi que les terrains arrière littoraux sont submergés et inondés pendant l'intégralité de la tempête entrainant un transport de sable vers l'intérieur des terres.

A ces impacts morphologiques visibles et observables sur le littoral, il est essentiel d'ajouter les impacts affectant les barres sédimentaires d'avant côte.

Ces dernières, présentes sous de faibles profondeurs (2 à 3 m), constituent une barrière naturelle de protection du littoral mais également un important stock sédimentaire sableux. Durant un évènement de forte intensité, la barre externe peut migrer vers le large, augmentant ainsi la vulnérabilité de la plage. Dans la majorité des cas, le système retrouve sa configuration initiale. Mais, lors d'évènements extrêmes, le système ne peut pas toujours être régénéré, les barres peuvent alors disparaître (Certain, 2002 ; Ferreira, 2005), ce qui aura pour conséquence d'augmenter la vulnérabilité du littoral lors de prochains évènements tempétueux (Armaroli *et al*., 2005).

2.1.3. Impacts socio-économiques

Outre les impacts morphologiques, les répercussions des évènements de tempêtes sur le littoral peuvent être d'ordre socio-économique.

Le littoral du Golfe du Lion était fortement anthropisé et peuplé. De nombreux aménagements y ont été réalisés et l'urbanisation s'y est très fortement développée. Les constructions implantées en front de mer sont désormais fortement exposées et vulnérables lors d'épisodes de tempêtes.

On distingue tout d'abord les impacts socio-économiques directs définis comme les dommages causés aux infrastructures ou habitations. En effet, lors de tempêtes importantes, il est fréquent d'observer de nombreux dégâts matériels tels l'inondation et l'ensablement des villas de front de mer, voire, dans des cas extrêmes, leur destruction (Illustrations 8).

Illustration 8 : Ensablement d'une villa (à gauche) et destruction (à droite) sur la plage du Racou (Argelès-sur-Mer) lors de la tempête de décembre 1997.

Par ailleurs, les infrastructures de protection marines comme les digues ou les épis subissent elles aussi des dommages liés au déferlement des vagues et au vent. Ces dernières peuvent être partiellement, voire, totalement détruites (Illustration 9).

En plus de ces dommages directs, s'ajoutent des dommages socio-économiques de type indirect. Les axes de communication qui longent le littoral sont en effet également exposés au risque tempête et peuvent être soit submergés soit détruits ce qui tend à bloquer les activités économiques d'une commune, d'un département ou de la région. C'est le cas notamment pour la Route Nationale 112 qui longeait le littoral de Sète à Marseillan qui fut maintes fois submergée et coupée lors d'épisodes tempétueux (Illustration 9) ou encore les lignes SNCF à proximité des étangs arrière-littoraux de Sète ou de Leucate. La fermeture de ces voies d'accès peut s'avérer très pénalisante lors de gestions de crise au cours desquelles ces accès sont nécessaires pour les secours ou les évacuations.

Illustration 9 : Destruction totale de la Digue de Cerbère après la tempête de décembre 2008 (à gauche) et destruction de la RN 112 de Sète à Marseillan après la tempête de décembre 1997

2.2. METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES

Cette partie décrit l'ensemble des sources de données et d'informations utilisées pour caractériser les impacts des tempêtes dans le Golfe du Lion. Bien qu'une tempête puisse être définie par de nombreux paramètres (vitesse du vent, importance des impacts, …), le facteur retenu ici pour caractériser les tempêtes marines est **la houle**, que l'on définit généralement par le triplet (Hs, Tp, Dp), représentant respectivement la hauteur significative, la période de pic, et la direction de pic. Ces données sont issues des houlographes du Golfe du Lion, qui pour obtenir des séries temporelles plus longues ont été ici complétées à l'aide de modèles hydrodynamiques forcés par des observations de vent.

2.2.1. Données issues des bouées

Dans le golfe du Lion, le système de mesures est constitué de quatre houlographes dispersés le long du littoral (Cf. illustration 10) : Espiguette, Sète, Leucate, Banyuls. Les mesures de houle proviennent des bouées gérées par la DREAL. Ces mesures sont intégrées dans le réseau national du CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales) via le site Candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ).

	Espiguette	Sète	Leucate	Banyuls
Localisation	47°24,660'N	43°22,261'N	42°55,000'N	42°29,370'N
	04°09,750'E	03°46,777'E	03°07,500'E	03°10,060'E
Type de bouée	Datawell Waverider	Datawell Waverider MKIII	Datawell Waverider MKIII	Datawell Waverider MKIII
Date de mise à l'eau	10/09/2008	16/02/2006	16/12/2006	28/11/2007
Profondeur	32 m	30 m	40 m	50 m
Sites de réception à terre	Capitainerie de Port Camargue Maison de la mer au Grau du Roi	Capitainerie de Sète Phares et balises de Sète	Capitainerie de Port la Nouvelle Phare de Leucate	Phare du Cap Béart Laboratoire Arago

Illustration 10 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des houlographes du Golfe du Lion.

Les quatre houlographes précédemment présentés sont des houlographes directionnels qui enregistrent les caractéristiques de la houle en temps réel, à savoir la hauteur et la période significatives, la hauteur et la période maximales, la direction de la houle ainsi que la température de l'eau. Pour chaque bouée, les données sont enregistrées en continu sur des intervalles de 30 minutes. Comme l'indique l'illustration 10, les houlographes directionnels fonctionnent depuis très peu de temps (2006 à 2010) et sont donc insuffisants pour l'analyse statistique des tempêtes.

2.2.2. Données issues de la modélisation numérique

Afin d'obtenir des informations plus précises sur les événements passés, le recours à la simulation numérique peut s'avérer utile. La démarche consiste généralement à

utiliser des données archivées ou des simulations de vents pour simuler la génération de la houle. Les modèles de génération et de propagation de la houle sont désormais robustes, et seule la qualité des vents utilisés peut influer significativement les calculs de vagues.

Parmi les champs de vents disponibles pour ce type d'analyses, on peut citer les vents NCEP, NCEP2 et CFSR. Ces champs de vents sont issus de modèles de prévision qui ont été améliorés à posteriori à l'aide d'observation in-situ.

Les champs de vent **NCEP et NCEP2 (National Center for Environmental Prediction)** sont produits par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Il s'agit de données issues d'une ré-analyse de prévision météorologique en assimilant des données mesurées. Les données sont disponibles sur une grille de 0.5°*0.5°, de 1979 à 2009. Il s'agit de champs de données météorologiques proches de la surface, comprenant la température à 2m, l'humidité spécifique et les vents à 10 m **(données tri-horaires)**.

Les données NCEP2 (avec une grille de résolution 1.9°*1.9°) ont notamment été utilisées pour constituer la base de données des états de mer ANEMOC (Morellato et Benoit, 2009). L'utilisation de ces vents produit une sous-estimation moyenne de la hauteur de vague de l'ordre de 0 à 20%, pouvant atteindre jusqu'à 40% sur les côtes françaises (Morellato et Benoit, 2009). Ces résultats sont en cours d'amélioration par le CETMEF.

Les champs de vent **CFSR (Climate Forecast System Reanalysis,** Saha *et al.*, 2010**)** constituent en théorie une amélioration du modèle NCEP développée en janvier 2010 et tendra à supplanter ce dernier dans les années à venir tant sur l'étendue que sur la portée des informations extraites. Il a été conçu et développé comme un modèle climatique global, haute résolution (0.5°*0.5°). C'est un système couplé qui regroupe des données atmosphériques, océaniques, terrestres ainsi que des données sur les glaciers. Il permet de fournir la meilleure estimation de l'état du système climatique. Ce modèle est basé sur l'exploitation et le forçage de **données horaires** de vents et de pressions atmosphériques à l'échelle mondiale disponibles sur le site internet de la NOAA. L'assimilation des données a été améliorée avec notamment l'utilisation de données satellitales et la résolution horizontale et verticale de l'atmosphère est meilleure que dans les versions NCEP et NCEP2. Les sorties de ces ré-analyses sont également disponibles de 1979 à fin 2009.

Après évaluation des deux sources de vents, les données CFSR ont donc été choisies pour reconstituer les conditions de houle lors des tempêtes de 1979 à 2009 à l'aide du modèle SWAN.

Le modèle SWAN (Simulating Wave Nearshore, Booj et al., 1999)

- **Description du modèle SWAN:**

SWAN est un modèle spectral de houle développé par l'Université de Delft (Pays Bas) prenant en compte divers phénomènes :

- La propagation de la houle dans le temps et l'espace, le shoaling, la réfraction due aux courants ou à la bathymétrie ;
- La génération des vagues par le vent ;
- Les interactions vague à vague ou les interactions pour les houles composées de 3 à 4 nombres d'ondes en résonnance ;
- Le moutonnement, le frottement au fond et le déferlement dû aux variations bathymétriques ;
- Le Set-up induit par la houle ;

Swan est généralement utilisé pour simuler la propagation de la houle sur des zones côtières sans ouvrages et pour des bathymétries simples à complexes (Booij *et al*., 1999). Le domaine d'étude s'étend du kilomètre à plusieurs centaines de kilomètres.

- **Stratégie de modélisation de la houle :**

Le modèle SWAN décrit précédemment a été utilisé pour modéliser la houle à partir des sources de vents. Le principe de la modélisation et de l'exploitation des résultats est présenté sur l'Illustration 11.

Le modèle SWAN Rang 1, de grande emprise permet d'appréhender la génération de la houle par le vent et d'avoir une idée globale de la propagation de la houle vers la côte (Cf. illustration 12). Le rang 1 « Méditerranée occidentale » se cale sur la grille CFSR afin d'avoir une entrée de vent pour chaque maille du modèle et reconstituer au mieux la houle. Le modèle SWAN Rang 2, plus fin et donc plus précis permet de déterminer les caractéristiques de la houle à la côte sur une échelle plus locale. Il utilise pour ce faire les données issues du Rang 1.

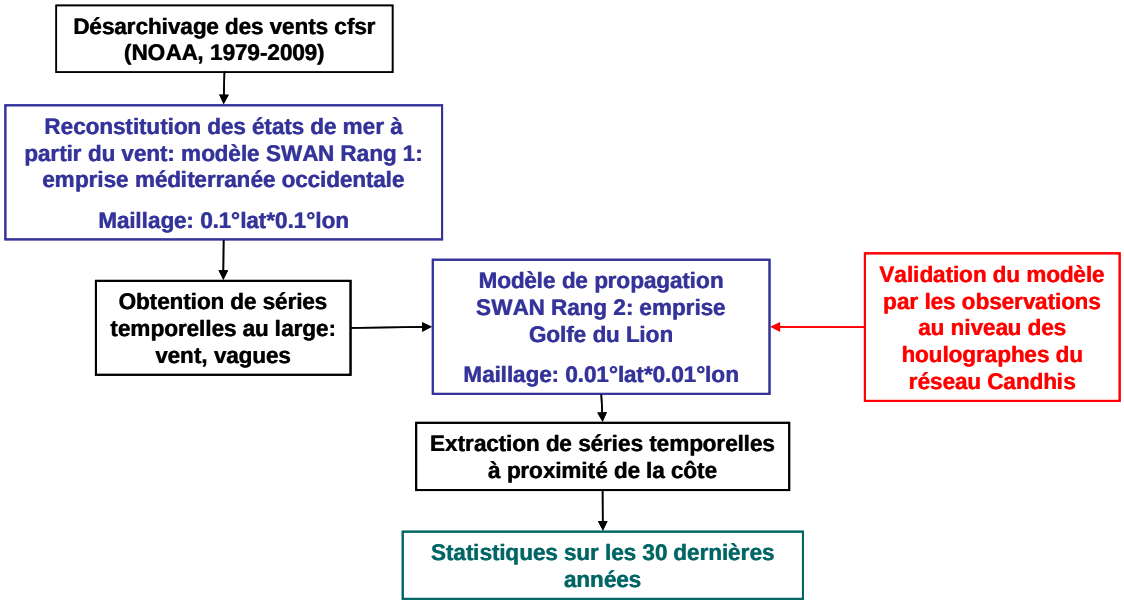


Illustration 11 : Présentation de la méthode d'exploitation des données par modélisation.

Emprise du modèle SWAN Rang 1 : Méditerranée occidentale, maillage 0.1*0.1

Emprise du modèle SWAN Rang 2 : Golfe du Lion, maillage 0.01*0.01

Illustration 12 : Représentation de l'emprise des modèles SWAN Rang1 et Rang 2.

Pour pouvoir caractériser les tempêtes, on extrait du modèle SWAN Rang 2 les informations suivantes : la hauteur significative (**Hs**), la période de pic (**Rtpeak**), la période moyenne (**Tm01**), la direction moyenne (**Dir**), la direction de pic (**PkDir**), la profondeur (**Depth**).

Lors de la simulation de la houle, les incertitudes existant sur les données d'origine et les modèles de vents se propagent, et une validation des résultats est indispensable.

Exploitation des données modélisées

Les temps de simulation rétrospective étant très importants, l'analyse a porté sur les événements les plus importants de 3 dernières décennies ainsi que quelques événements considérés moins importants mais pour lesquels des observations d'impacts avaient été recensées dans la Banque de données tempêtes (BD_Tempêtes). Ainsi, c'est un total de 46 tempêtes qui ont été simulées à l'aide de SWAN. La liste de ces évènements est présentée en Annexe 2.

Dans le but d'évaluer l'impact des tempêtes sur l'ensemble du Golfe du Lion, les données du modèle sont extraites en 5 points dispersés le long du littoral : l'Espiguette, Sète, Gruissan, Leucate et Banyuls. Les sorties correspondent aux positions des bouées de la DREAL-LR afin de pouvoir comparer les séries mesurées aux séries simulées, à l'exception de Gruissan qui constitue une bouée virtuelle supplémentaire pour le secteur de l'Aude.

L'analyse des simulations de tempêtes repose sur les hypothèses suivantes :

- Les caractéristiques de la tempêtes sont calculées sur les conditions de vagues supérieures à 2 m ;
- La durée minimale d'un événement est de 6h ;

- La durée minimale entre 2 événements est de 12h. En dessous de ce seuil, on considère que l'on observe toujours le même événement.

Pour chaque événement et pour chacun des 5 sites, on extrait :

- Les dates de début et fin de la tempête ;
- La durée de la tempête (heures) ;
- La durée inter-tempêtes (heures) ;
- La date de Hs max ;
- Hs max (m) ;
- Hs moyen (m) ;
- La période moyenne sur le pic d'énergie de la tempête (s) ;
- La période de pic pour Hs max (s) ;
- La date Tpic max (date du maximum de la période) ;
- La direction de pic en coordonnées nautiques (°) ;
- La direction globale moyenne (°) ;
- L'incidence de la houle par rapport à la côte (°) ;
- L'énergie totale de la tempête (J/m²) ;
- La puissance de la tempête.

2.2.3. Données issues de la BD_tempêtes

La BD_Tempêtes développée par le BRGM en 2008 dans le cadre du projet européen MICORE[1] permet un accès simplifié à l'ensemble des informations disponibles dans la région Languedoc-Roussillon sur les situations récentes et sur les évènements passés de tempêtes marines. Elle contient à la fois les informations relatives à l'événement (hauteur de vagues, direction et vitesses du vent, surcote observée, …) et les informations disponibles sur les impacts. Cette base de données contenant 237 enregistrements permet de retrouver par date et par commune les impacts générés par les tempêtes sur une période s'échelonnant de 1940 à avril 2008. Elle se compose d'un ensemble d'éléments provenant de sources variées telles que des sites Internet, des rapports de bureau d'étude, des thèses, des articles, des données de mairies et des données de la DREAL du Languedoc-Roussillon.

[1] MICORE (Impacts Morphologiques et Risques côtiers induits par les événements de tempêtes extrêmes, 2008-2011) est un projet européen du 7ème Projet Cadre de Recherche et développement n°202798.

2.2.4. Données topographiques

Pour appréhender la géomorphologie du littoral du Golfe du Lion, la DREAL du Languedoc-Roussillon a pu mettre à notre disposition des profils topographiques effectués sur des périodes s'échelonnant de 1989 à 2001 ainsi que les données topographiques du LIDAR (Light Detection And Ranging) 2009 permettant la réalisation de MNT (Modèle Numérique de Terrain).

2.3. RECONSTITUTIONS DES SERIES TEMPORELLES DE VAGUES AVEC LE MODELE SWAN

2.3.1. Calibration des simulations avec le vent CFSR

Afin de s'assurer de la validité des simulations de la houle, les sorties des modèles ont été comparées aux mesures des 4 bouées houlographes pour 5 tempêtes récentes :

- Tempête du 01 au 03/11/2008 : tempête de Sud à Sud-Est ;
- Tempête du 26 au 28/12/2008 : tempête d'Est à Sud-Est ;
- Tempête du 01 au 03/02/2009 : tempête de Sud Sud-Est ;
- Tempête du 24 au 27/04/2009 : tempête d'Est sur l'ensemble du Golfe du Lion avec un changement de direction vers le Nord-Ouest le 26 avril ;
- Tempête du 20 au 22/10/2009 : tempête de Sud-Sud-Est.

La calibration du modèle a été établie à partir des hauteurs significatives de la houle (Hs en m), directions de pic de la houle et périodes de pic (Tp en sec).

Les Illustrations 13 et 14 présentent les résultats des comparaisons entre les données observées au niveau des houlographes du Golfe du Lion et les données modélisées grâce au modèle SWAN (CFSR).

De manière globale, on constate (cf. illustration 13) que les hauteurs de vagues reconstituées sont bien corrélées avec les mesures. Les coefficients de corrélation sont relativement bons (supérieurs à 0.8, à l'exception de la bouée de Sète qui a un coefficient de corrélation de 0.7)

La comparaison des directions de la houle simulées et mesurées (cf. illustration 14) présentent également des résultats satisfaisants avec des corrélations de l'ordre de 0.5. Les dispersions sont toutefois plus importantes que pour les hauteurs significatives.

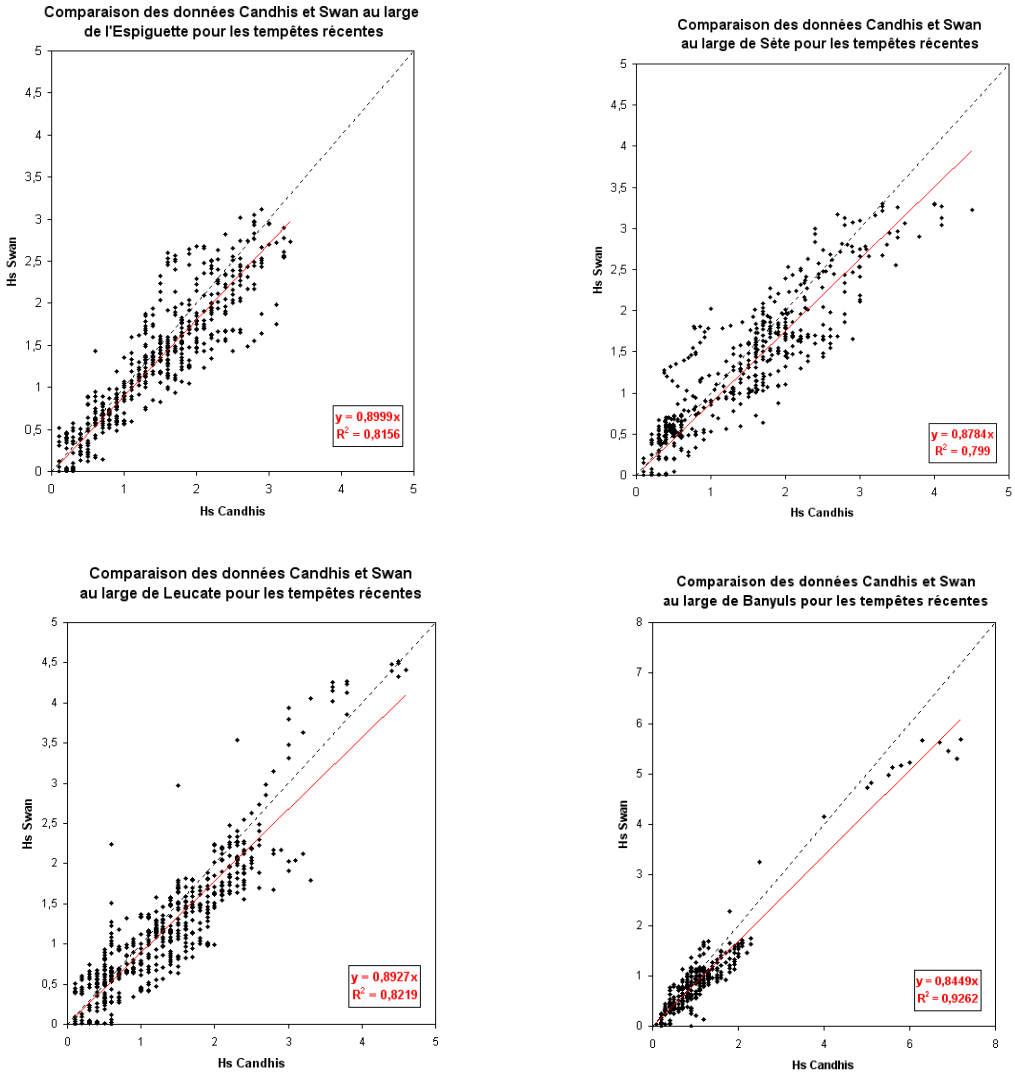


Illustration 13 : Comparaisons des hauteurs significatives de la houle entre les données observées au niveau des 4 houlographes du Golfe du Lion et les données modélisées pour les tempêtes récentes.

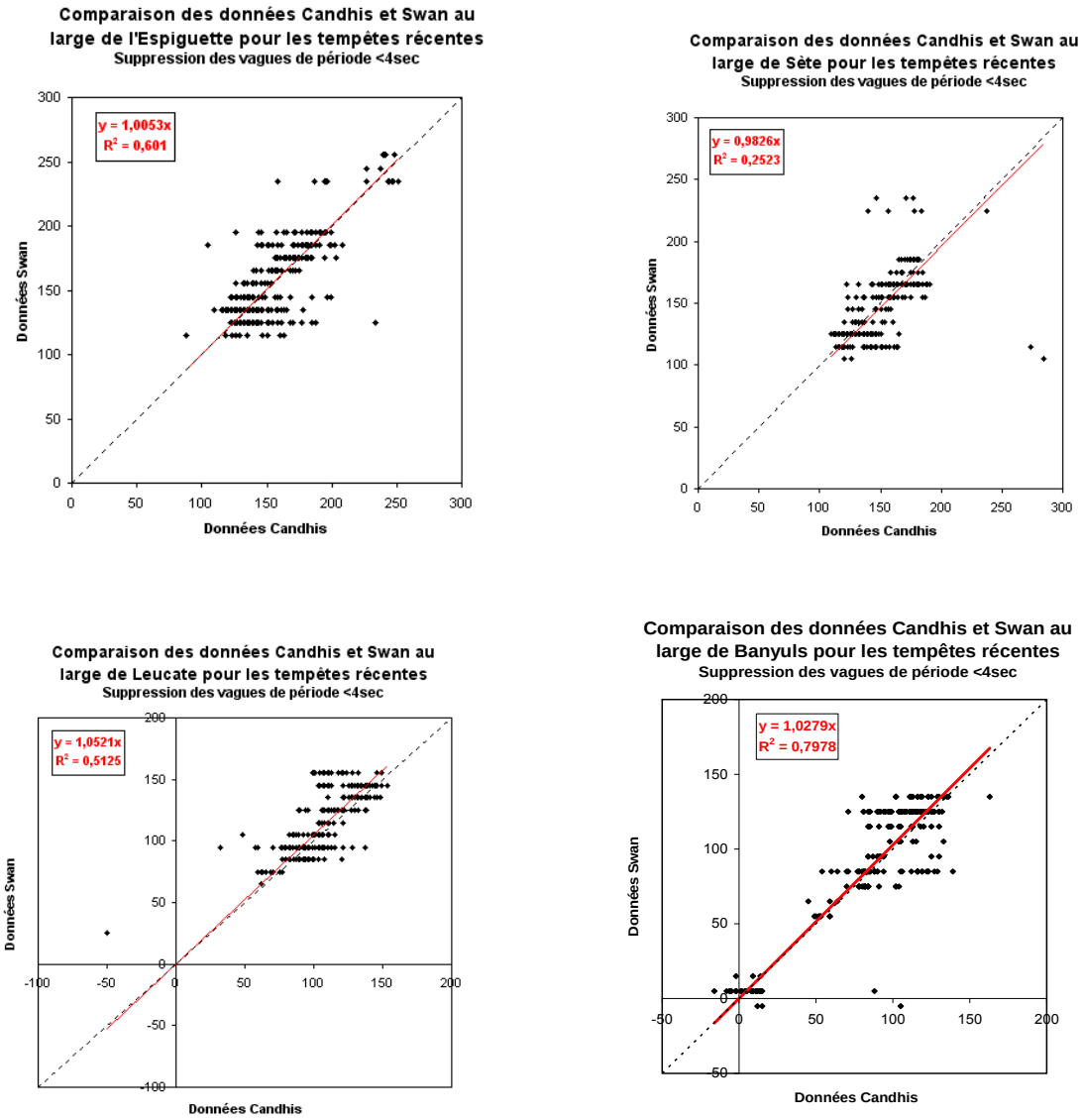


Illustration 14 : Comparaison des directions de pic de la houle entre les données observées au niveau des 4 houlographes du Golfe du Lion et les données modélisées pour les tempêtes récentes.

2.3.2. Comparaison des modèles SWAN NCEP et CFSR

Les résultats des simulations utilisant les champs de vent NCEP ne sont pas présentés ici. Toutefois, une comparaison a été effectuée en début d'étude pour s'assurer de l'utilité de nouvelles simulations par rapports aux bases existantes (comme

ANEMOC[2]). L'illustration 15 présente un récapitulatif et une comparaison entre les résultats obtenus à partir de la modélisation issue des vents NCEP et ceux obtenus à partir des vents CFSR.

Pour tous les points simulés, les données de vents CFSR permettent d'obtenir des séries de houle beaucoup plus réalistes lors des épisodes de tempêtes avec des coefficients de corrélation (R^2) supérieurs dans tous les cas. Les différences entre les NCEP et CFSR sont encore plus significatives en ce qui concerne la direction de propagation de la houle.

	Hauteur significative de la houle		Direction de pic de la houle	
	NCEP	CFSR	NCEP	CFSR
Espiguette	y= 0,7547 R^2= 0,3942	y= 1,005 R^2= 0,7317	y= 1,0184 R^2= 0,3842	y= 1,0053 R^2= 0,601
Sète	y= 0,9542 R^2= 0,5662	y= 0,8784 R^2= 0,799	y= 1,0122 R^2= 0,1216	y= 0,9826 R^2= 0,2523
Leucate	y= 1,0655 R^2= 0,6563	y= 0,8927 R^2= 0,8219	y= 1,1501 R^2= 0,2706	y= 1,0521 R^2= 0,5125
Banyuls	y= 0,9002 R^2= 0,5444	y= 0,8449 R^2= 0,9262	y= 1,1492 R^2= 0,4097	y= 1,0279 R^2= 0,7978

Illustration 15 : Comparaison des résultats obtenus à partir des différentes modélisations.

Dans la suite de l'analyse, les simulations réalisées avec les champs de vents issus de CFSR seront donc utilisées pour caractériser les différents événements de tempêtes depuis 1979.

2.4. LES TEMPETES DANS LE GOLFE DU LION DEPUIS 1979

La reconstitution des événements passés sur les différents secteurs du Golfe du Lion met en évidence une exposition différenciée le long du littoral du Golfe du Lion. L'illustration 16 présente une analyse statistique rapide des évènements de tempêtes modélisés sur l'ensemble du Golfe du Lion. Le nombre de tempêtes affectant le littoral diminue du Nord au Sud avec une nette différence sur le secteur d'Argelès-sur-Mer. En effet, sur les sites de l'Espiguette et de Sète, ce sont respectivement 39 et 38 évènements qui sont recensés depuis 1979 tandis qu'à Argelès-sur-Mer, seulement 21 tempêtes ont touché la côte. Cela peut s'expliquer par le fait que les tempêtes de Sud-Est sont plus fréquentes que les tempêtes d'Est.

La répartition des classes de vagues est similaire pour tous les secteurs du Golfe du Lion (cf. illustration 16). Les événements pour lesquels les vagues ont une hauteur significative supérieure à 5 m restent peu nombreux. Le nombre de tempête avec des vagues supérieures à 4 m est plus important sur les secteurs de Sète Gruissan et Leucate, en raison de leur exposition aux houles prédominantes de SE.

[2] Atlas Numériques d'Etats de mer Océanique et Côtier (CETMEF / EDF R&D-LNHE)

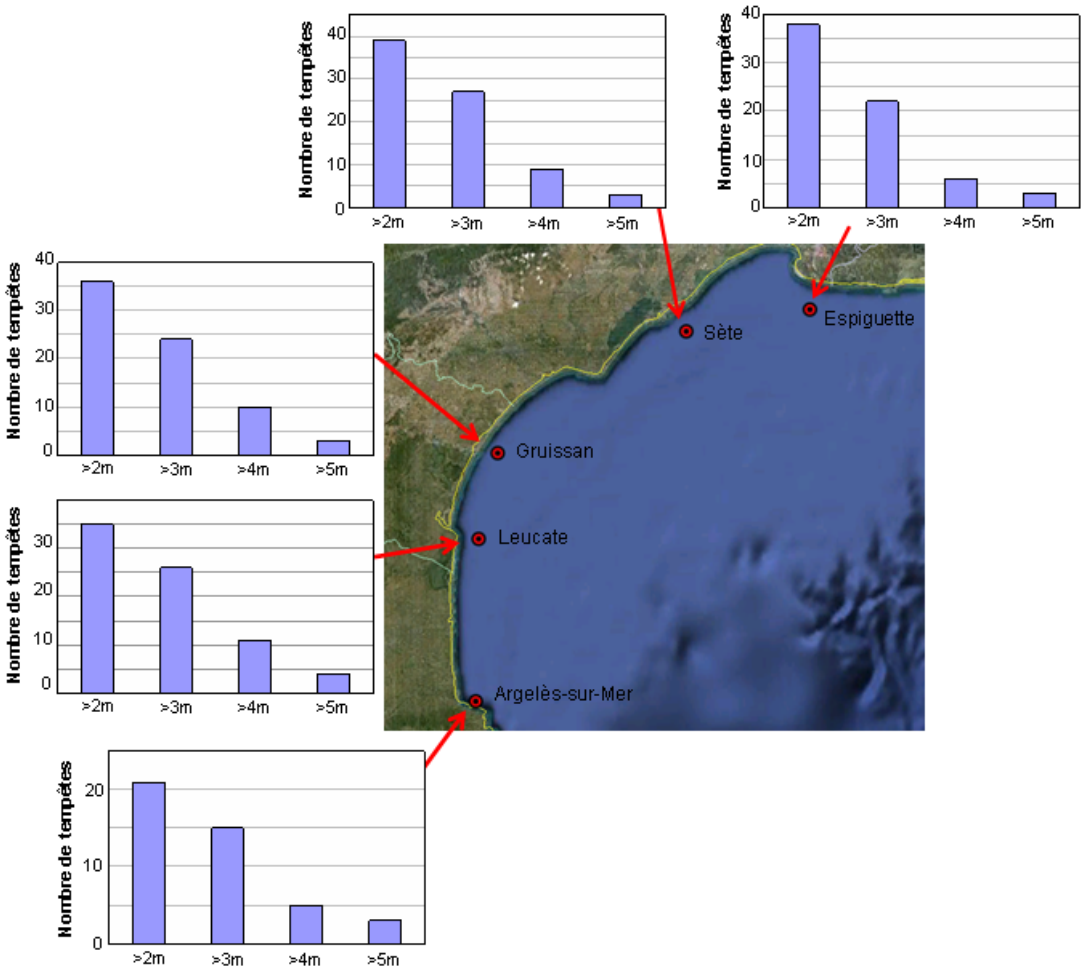


Illustration 16 : Analyse statistique des tempêtes modélisées sur l'ensemble du Golfe du Lion.

2.4.1. Analyse statistique des tempêtes sur l'ensemble du Languedoc-Roussillon

Pour chacun des points extraits des simulations, une analyse statistique a été réalisée afin d'évaluer la saisonnalité des événements et leur évolution depuis 1979. Cette analyse porte sur les tempêtes majeures (46 tempêtes) pour lesquelles les conditions de vague ont été simulées (cf. 2.2.2).

L'illustration 17 présente la répartition mensuelle de ces événements majeurs ainsi que le nombre d'événements importants par hiver depuis 1979. La majorité des événements importants se produisent lors de la période hivernale, d'octobre à février. Sur le trois dernières décennies, on observe une diminution du nombre d'événements en mars et une reprise au mois d'avril (de 2 à 4 événements majeurs sur la période considérée).

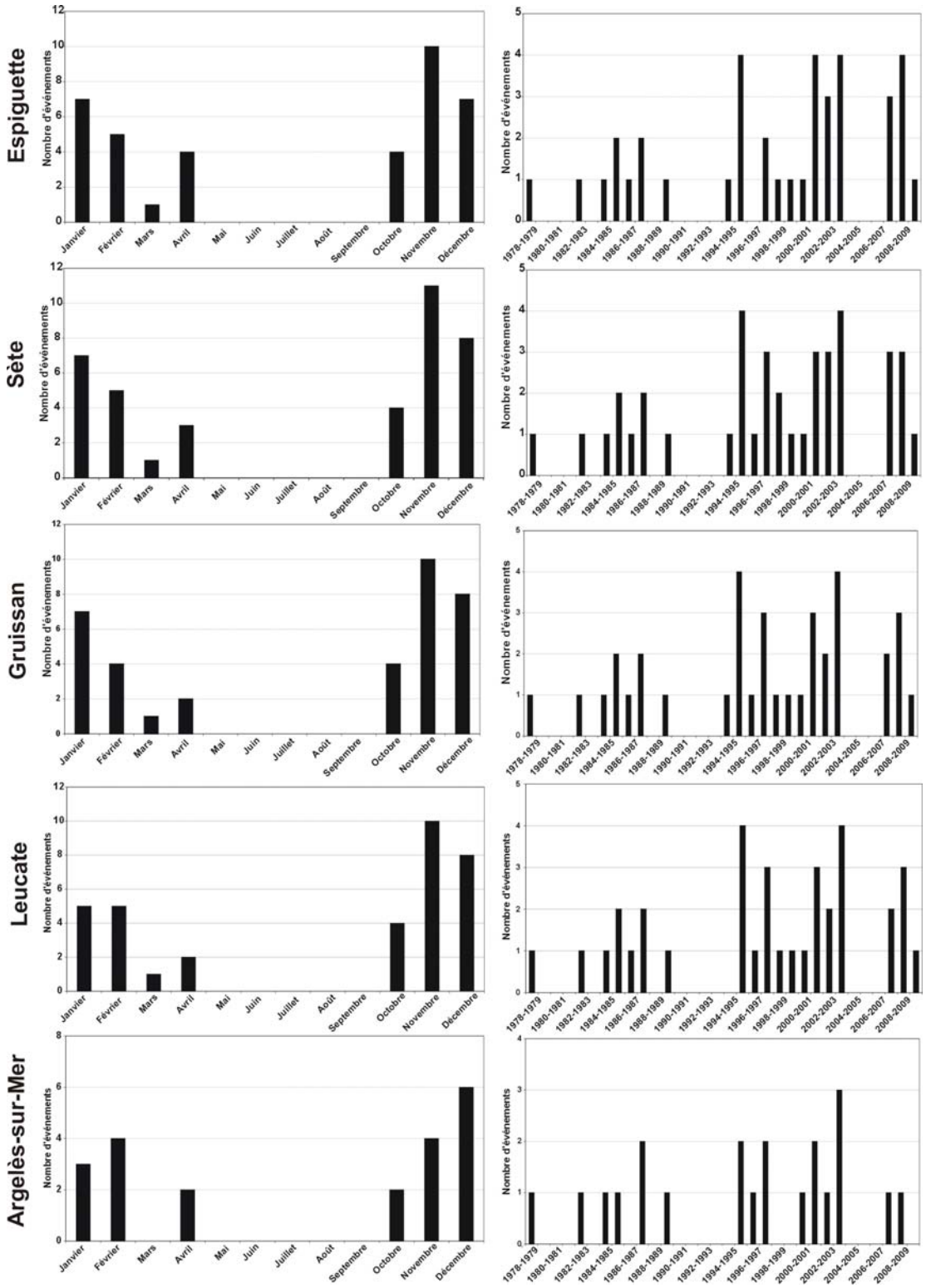


Illustration 17 : Saisonnalite des tempêtes majeures sur l'ensemble du Languedoc-Roussillon et nombre d'événements par hiver depuis 1979 (échantillon de 46 événements majeurs).

Le nombre d'événements importants par hiver est fortement variable depuis 1979 (cf. illustration 17). Si on observe généralement un événement important par hiver, certains hivers ont été particulièrement énergétiques. C'est le cas de l'hiver 1995-1996 qui a connu un grand nombre d'événements (une dizaine de coups de mer) dont 4 sont considérés comme importants et ont générés des impacts.

On observe une quantité plus importante d'événements énergétiques depuis 1994. Toutefois, la forte variabilité interannuelle et l'extension temporelle de la série analysée (30 ans) ne permettent pas de dégager de tendance statistiquement fiable sur l'évolution du nombre de tempêtes fortes depuis 1979.

Bien que cette analyse repose sur les événements les plus importants ou ayant entraîné des dommages, cette absence de tendance dans la fréquence des événements confirme les résultats obtenus dans le cadre du projet MICORE sur le secteur de Sète qui présentait une très légère hausse de la fréquence des tempêtes depuis 1970 peu fiable statistiquement (Balouin *et al*., 2009).

2.4.2. Analyse des caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes sur le Languedoc-Roussillon

L'illustration 18 présente les caractéristiques hydrodynamiques de l'ensemble des tempêtes modélisées sur chacun des cinq sites étudiés. Pour chacun de ces événements majeurs sont représentés la direction de la houle, la période au pic de la tempête, la hauteur significative au pic de la tempête, l'énergie de la houle sur la totalité de l'événement et la durée de la tempête.

La direction de pic de la houle varie sensiblement en fonction de l'orientation de la côte et de la localisation des bouées. Aux différents points extraits du modèle, on note une réorientation des vagues proches de la côte, de telle sorte que l'incidence de la houle est très faible.

Les périodes de houle sont relativement similaires sur les différents secteurs du Golfe du Lion. Elles sont de l'ordre de 10 sec pour ces événements intenses, pouvant atteindre jusqu'à 14 sec pour la tempête de 2003 dans la partie nord du Golfe.

Les hauteurs de vagues de ces événements varient de 2.5 m à 7 m. Pour chaque événement, la hauteur aux différents points du Golfe du Lion dépend de la direction de provenance des vagues, les houles d'Est affectant particulièrement le Roussillon, alors que les houles de SE vont atteindre les côtes de l'Hérault et de l'Aude avec des hauteurs plus importantes. Sur chacun des secteurs, ce sont les tempêtes de décembre 1997 et novembre 1982 qui apparaissent comme les plus violentes avec une valeur maximum de Hs estimée à 6,09 mètres à Sète le 16/12/1997.

L'énergie des tempêtes est un indicateur intéressant car il traduit à la fois les caractéristiques de la houle et la durée de l'événement. Il permet donc de distinguer des événements d'amplitude similaire mais agissant sur des périodes de temps différentes. On peut ainsi constater que les événements de nov 1982 et dec 1997, lors desquels les hauteurs de vagues étaient relativement similaires, sont assez différents.

L'énergie dissipée lors de la tempête de 1997 est beaucoup plus importante du fait de la longueur de l'événement (proche de 90h dans la partie nord du Golfe du Lion).

Les simulations réalisées permettent également d'extraire la direction de provenance de la houle lors des 3 dernières décennies (cf. Illustration 19 et 20). Les houlographes du Golfe du Lion n'étant directionnels que depuis 2006, cette information est particulièrement intéressante pour caractériser les directions prédominantes des tempêtes qui touchent le littoral régional.

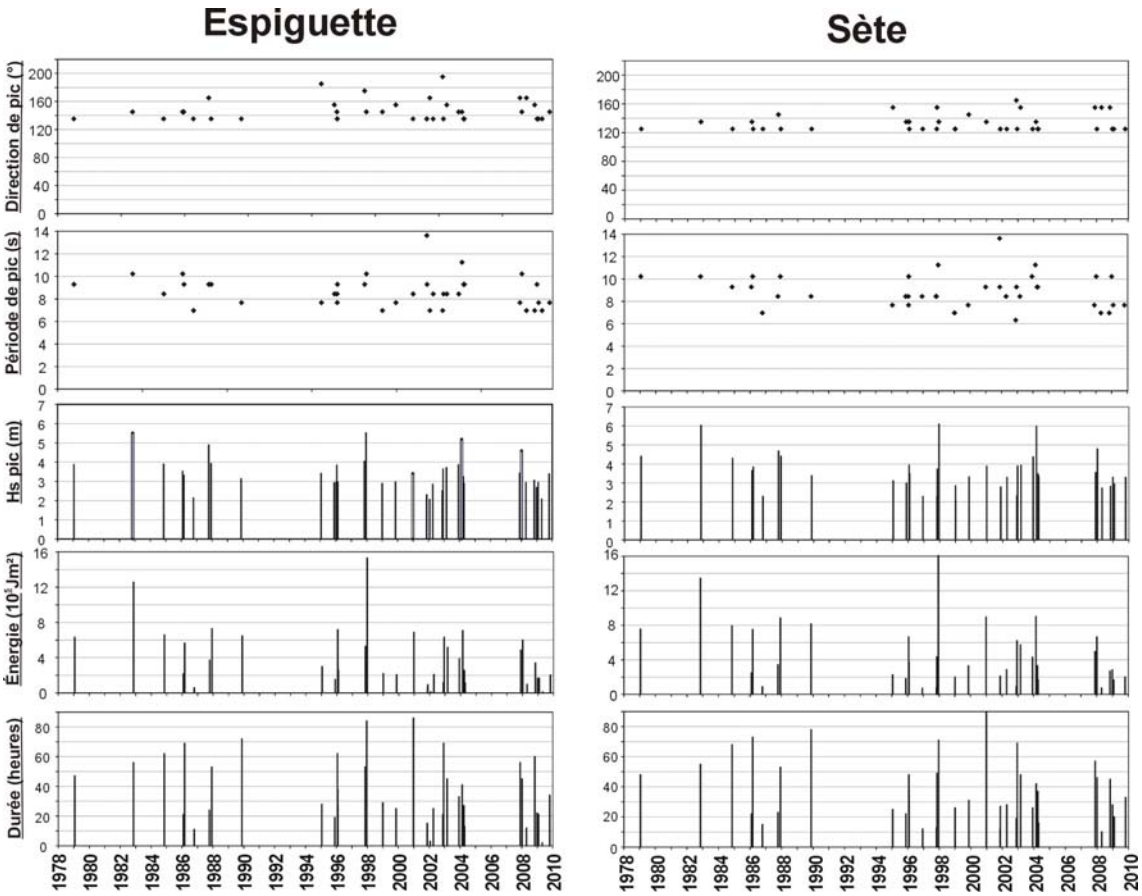


Illustration 18-a : Caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes au niveau des points Espiguette et Sète.

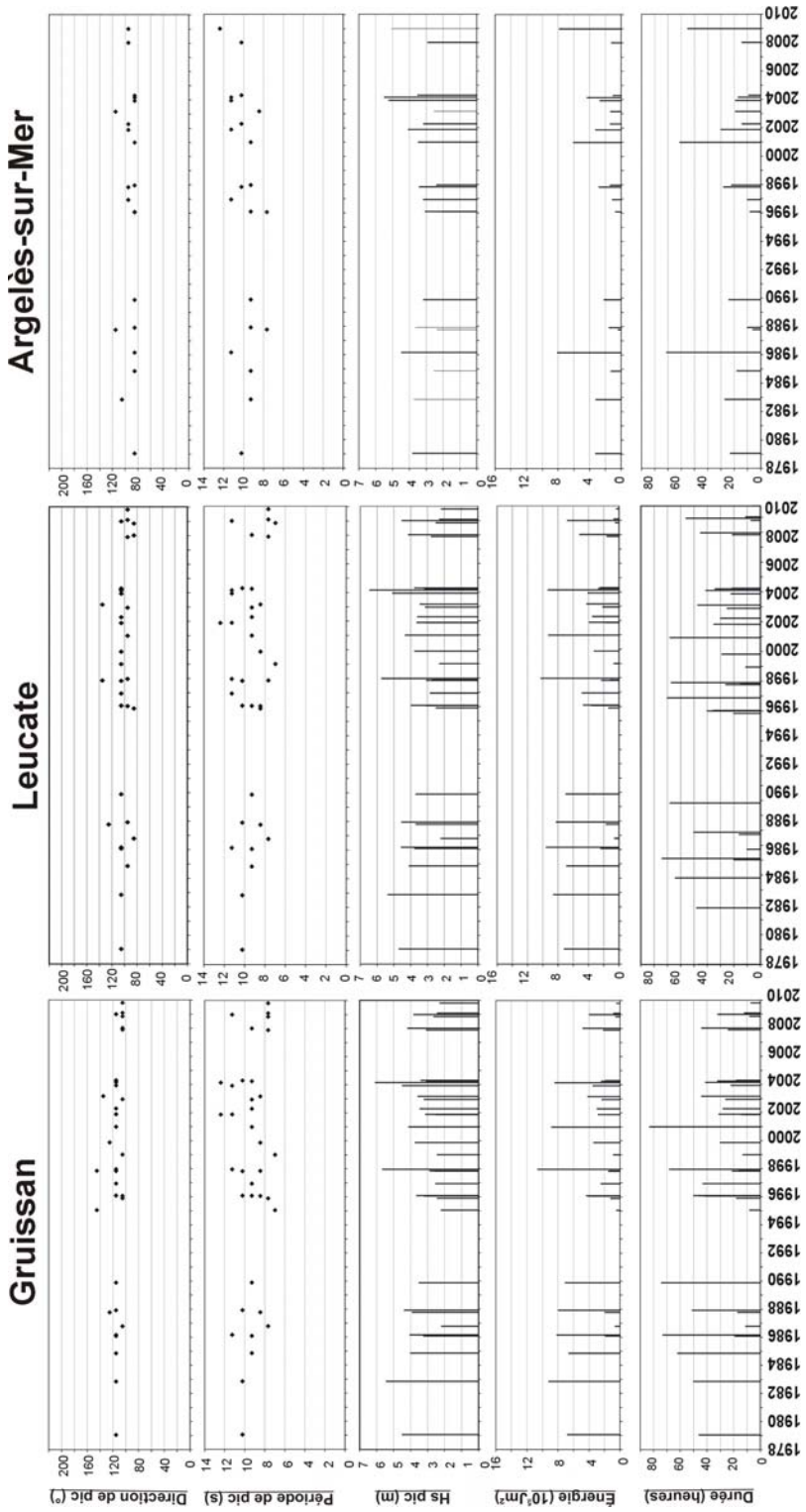


Illustration 18-b - Caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes au niveau des points Gruissan, Leucate et Argelès-sur-mer.

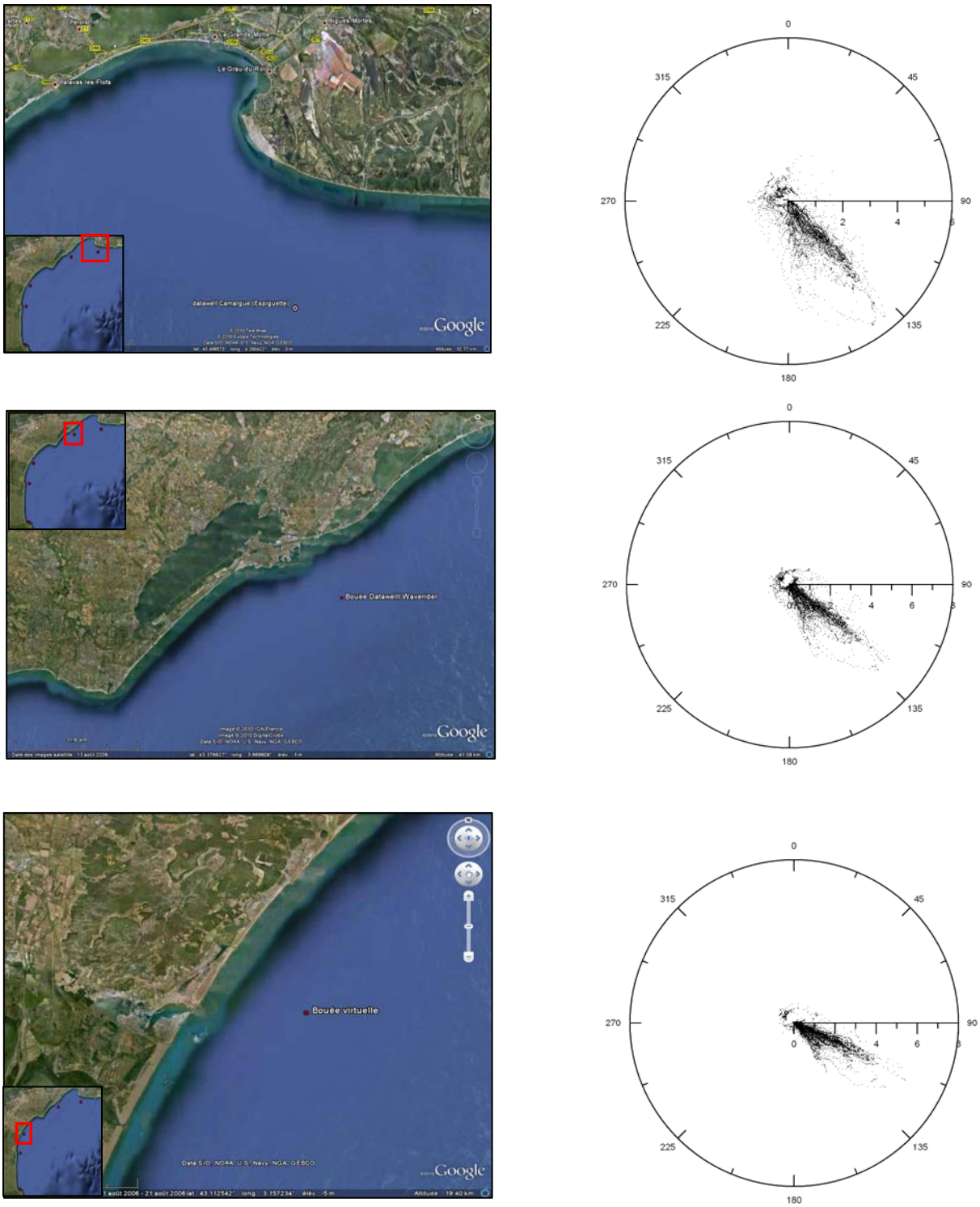


Illustration 19 : Représentation des directions moyennes des houles de tempêtes aux points Espiguette, Sète et Gruissan.

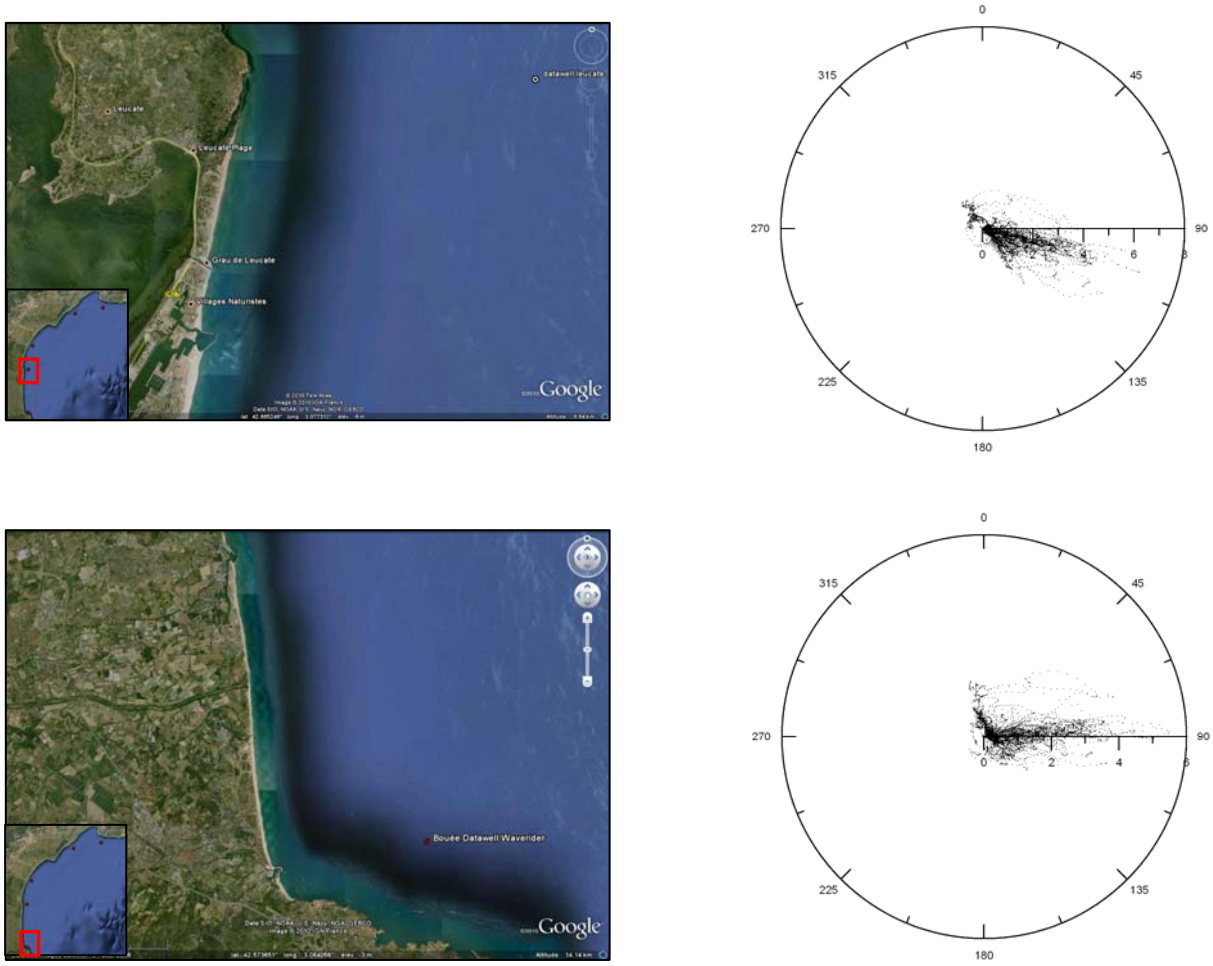


Illustration 20 : Représentation des directions moyennes de la houle sur chacun des sites d'étude.

Au large de l'Espiguette, on distingue deux directions principales de la houle pendant les tempêtes. Les tempêtes les plus fortes en termes de hauteur de houle se produisent selon un secteur Sud-Est avec une houle d'orientation N135. On distingue ensuite un second pic de direction orienté N170.

Au large de Sète, on peut distinguer également deux directions prédominantes des tempêtes. Les tempêtes de Sud-Est (N135) sont les plus fortes et les plus fréquentes. Ensuite, les tempêtes de Sud (N170).

Au large de Gruissan, on peut voir que la quasi-totalité des tempêtes se produisent selon un secteur Est à Sud-Est avec une direction de houle de l'ordre de N115.

Au large de Leucate, la houle a une direction N100 à N110 pour l'ensemble des évènements observés depuis 1979.

Enfin, au large d'Argelès-sur-Mer, la direction de la houle reste constante pour l'ensemble des tempêtes avec plus de 90% des valeurs comprises entre 85 et 90° soit une orientation Est. Cette tendance est étroitement liée avec l'orientation Nord-Sud de la côte et à la présence du Cap Creus qui atténue et modifie les houles de Sud.

2.5. LES IMPACTS DES TEMPETES ET SEUILS D'IMPACTS

Comme présenté dans la partie 2.1, les impacts des tempêtes peuvent être morphologiques (érosion, brèches, submersion) et socio-économiques (dégâts, victimes, dommages indirects).

Le recensement des événements et de leurs impacts connus dans la BD-tempête permet d'évaluer les seuils morphogènes et seuils d'impact sur le littoral régional.

Dans la partie nord du Golfe du Lion, les différents indicateurs d'intensité ou de durée des tempêtes ont été croisés aux indicateurs d'évolution morphologique et d'impacts. Cette analyse, menée dans le cadre du projet MICORE, a montré que parmi les différents descripteurs de tempête (hauteur de vagues, énergie, durée, niveau de surcote), la hauteur significative des vagues reste le critère le mieux corrélé avec l'augmentation des impacts. C'est donc ce paramètre qui est utilisé pour définir des seuils d'impact des tempêtes marines. L'étude des événements des dernières décennies a mis en évidence 3 seuils principaux (Gervais et al, 2011) :

- Hs (hauteur significative de la houle) ~ 3 m : changement de comportement des morphologies d'avant-côte (migration vers le large des barres sableuses) et franchissement des bermes par le jet de rive ;
- Hs ~ 4 m : inondation partielle à totale de la plage, érosion du front dunaire ;
- Hs ~ 5 m : franchissement des cordons dunaires de faible élévation (3 m NGF), franchissements des cordons naturels des lidos.

Ces seuils morphogènes sont également représentatifs des dommages et dégats occasionés. Ainsi, l'illustration 21 présente les résultats de l'analyse de 16 tempêtes ayant entrainés des dégats sur le littoral héraultais.

Dans le cadre la présente étude, une analyse similaire a été réalisée pour les autres secteurs du Golfe du Lion. L'illustration 22 présente les résultats obtenus sur le littoral du Roussillon sur la base des reconstitutions des tempêtes de 1979 à 2009 et des observations recensées dans la BD-Tempête.

Les seuils d'impacts résultant sont très proches de ceux observés sur le littoral héraultais avec des impacts significatifs dès lors que la hauteur de la houle au niveau de la bouée de Leucate dépasse les 4 m.

Hs (m)	3 - 4 m (4 events)	4 - 5 m (4 events)	> 5 m (8 events)
Overwash			✓
Erosion	✓	✓	✓
submersion		✓	✓
road destruction		✓	✓
dune erosion			✓
Boats	✓		✓
restaurants		✓	✓
bridge, railway & road closure	✓	✓	✓

Illustration 21 – Dégats observés sur le littoral héraultais en fonction de la hauteur significative de la houle (d'après Gervais et al., 2011).

Classe de tempête	Impacts observés	Photographies
Classe I - Tempête faible 2 < Hs < 2,8	Peu ou pas d'impacts observés Légère érosion de la plage	
Classe II - Tempête modérée 2,8 < Hs < 3,5	Aucun impact recensé sur la zone d'étude	Sainte-Marie le 10/12/2002 Torreilles le 10/12/2002
Classe III - Tempête significative 3,5 < Hs < 4,3	Submersions observées Laisses de mer Bateaux coulés et échoués Légers dommages aux infrastructures	Canet en Roussillon le 11/04/2002 Port la Nouvelle le 10/10/1987 Leucate le 11/11/1999
Classe IV - Tempête sévère 4,3 < Hs < 5	Faible érosion du cordon dunaire Submersions Ensablement du front de mer Dommages aux infrastructures et ouvrages de protection marines : Basculement de postes de secours, ganivelles arrachées	Saint-Cyprien le 28/12/2008 Cerbère le 28/12/2008 Argelès-sur-Mer le 06/12/1987
Classe V - Tempête extrême Hs > 5	Erosion générale du cordon dunaire Ouverture de graus Submersions et inondations des voiries et habitations Ensablement du front de mer et des habitations Dommages importants aux infrastructures: Destructions, effondrements de talus, affouillement des quais... Dommages importants aux ouvrages de protection marine: Destructions de brise-lames	Port la Nouvelle le 05/12/2003 Leucate le 17/12/1997 Leucate le 17/12/1997 Le Barcarès le 17/12/19997 Leucate le 17/12/1997

Sources Photographies: SMNLR, DRE, Mairies

Illustration 22 – Impacts observés sur le littoral du Roussillon en fonction de l'intensité des tempêtes.

2.6. OUTILS DE PREVISION DES TEMPETES

Les outils pour la prévision météo-océanographiques sont multiples. Différents organismes nationaux ou internationaux disposent de modèles numériques opérationnels pour la prévision des vents et de la houle. Par ailleurs, l'alerte météorologique est réalisée par Météo-France par la publication de bulletins

2.6.1. Modèles opérationnels de prévision du vent

De nombreux modèles météorologiques existent et de nombreux services météorologiques nationaux ou internationaux proposent des prévisions des vents à plus ou moins long terme (quelques heures à quelques jours).

Le tableau suivant (cf. illustration 23) présente une liste non-exhaustive des modèles météorologiques qui fournissent une prévision des vents pour la méditerranée occidentale.

Nom des modèles	Origine des modèles	Echéances des prévisions	Avantages	Inconvénients
Arpège http://france.meteofrance.com/france/mer	France	72 heures (3 jours)	Excellentes prévisions de la vitesse et de la direction du vent.	-Seule la prévision de la vitesse du vent et de la direction du vent est disponible gratuitement. -Pas de prévisions au-delà de 3 jours
ECMWF	Européen	168 heures (7 jours)	-Possibilité d'avoir une prévision à une longue échéance. -Bon positionnement des centres d'action. -Les géopotentiels sont aussi bien positionnés.	Il lui arrive de changer totalement de prévisions d'une mise à jour à l'autre.
Skiron http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php	Grèce	72 heures (3 jours)	-Les paramètres météorologiques essentiels sont disponibles sur différentes cartes. -Des cartes de prévisions très précises (temps prévu toutes les 3 h).	Ce n'est pas un modèle infaillible non plus.
COAMPS (Coupled Ocean / Atmosphere Mesoscale	USA	72 heures (3 jours)	- Haute résolution du modèle (20 km)	Ce n'est pas un modèle infaillible non

Prediction System) http://www.nrlmry.navy.mil/coamps-web/web/home			- Positionnement des centres d'action très bon.	plus.
GFS (Global Forecast system) http://www.wetter3.de/animation.html	USA	180 heures (7.5 jours)	-Les paramètres météorologiques essentiels sont disponibles sur différentes cartes. -Des cartes de prévisions très précises (temps prévu toutes les 3 h). -Possibilité d'avoir une prévision à 7 j.	-De temps en temps, quelques difficultés pour la prévision à J+5 et à J+6

Illustration 23 – Modèles de prévision des vents pour la méditerranée occidentale.

2.6.2. Modèles opérationnels de prévision de la houle

Comme pour la prévision des vents, de nombreux modèles opérationnels sont disponibles pour la prévision de la houle et des états de mer. Parmi ces opérateurs qui fournissent des prévisions de la houle, on peut citer :

- Fleet Numerical (FNMOC) : prévisions en Méditerranée avec le modèle Wavewatch III ;
- Puertos del Estado / INM : prévisions en Atlantique et Méditerranée avec le modèle WAM-4 ;
- Météo-France : prévisions pour les côtes françaises avec le modèle VAG (pages supplémentaires : vagues à 12h, houle à 12h, vagues à 24h, houle à 24 h ...) ;
- Previmer www.previmer.org : Wavewatch3 méditerranée.

Le système pré-opérationnel **PREVIMER** est issu d'un partenariat entre l'Ifremer, le SHOM, Météo-France, l'IRD, l'Institut Universitaire Européen de la Mer et le Technopôle Brest Iroise. Il est particulièrement intéressant car il permet de disposer d'un ensemble d'observations et d'outils de modélisations numériques qui permettent de fournir des prévisions à 4 jours (96h) sur l'état de la mer, les courants, les niveaux de marée, …

Bien que le service proposé reste expérimental, les prévisions disponibles sont de très bonne qualité. Les illustrations 24 et 25 présentent des comparaisons des prévisions de Previmer avec les données mesurées par les houlographes de la DREAL Languedoc-Roussillon pour l'année 2009.

On note sur ces comparaisons (bouée de Sète) que le modèle tend à sous-estimer légèrement les valeurs de hauteurs significatives de la houle lors des événements de tempête (cf. illustration 24). Toutefois, la comparaison mesures/prévisions est largement satisfaisante avec un coefficient de corrélation de 86%.

De plus, si les valeurs de pic sont parfois sous-estimées, le modèle prévoit très bien la génération et la montée en puissance de la houle. Ainsi, on observe (cf. illustration 25) une très bonne prévision du déroulement des événements observés durant l'année 2009. Le modèle simule très bien l'occurrence et l'arrivée des fortes houles sur le littoral.

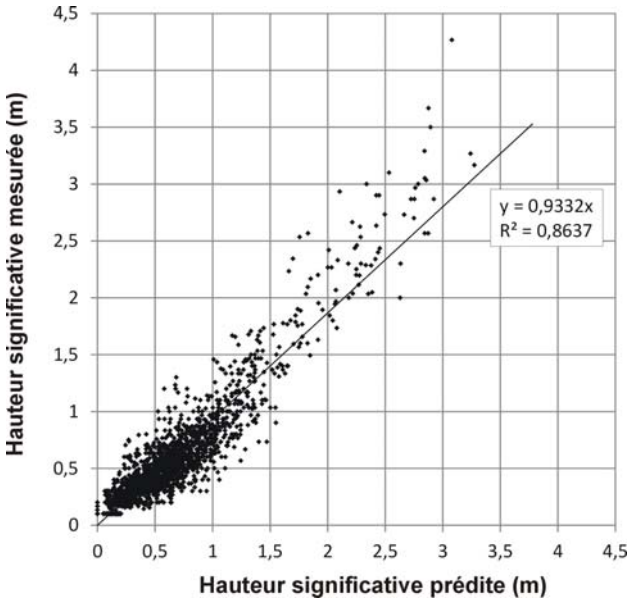


Illustration 24 – Comparaison entre les hauteurs significatives des vagues simulées/mesurées (au niveau de la bouée 34004 au large de Sète).

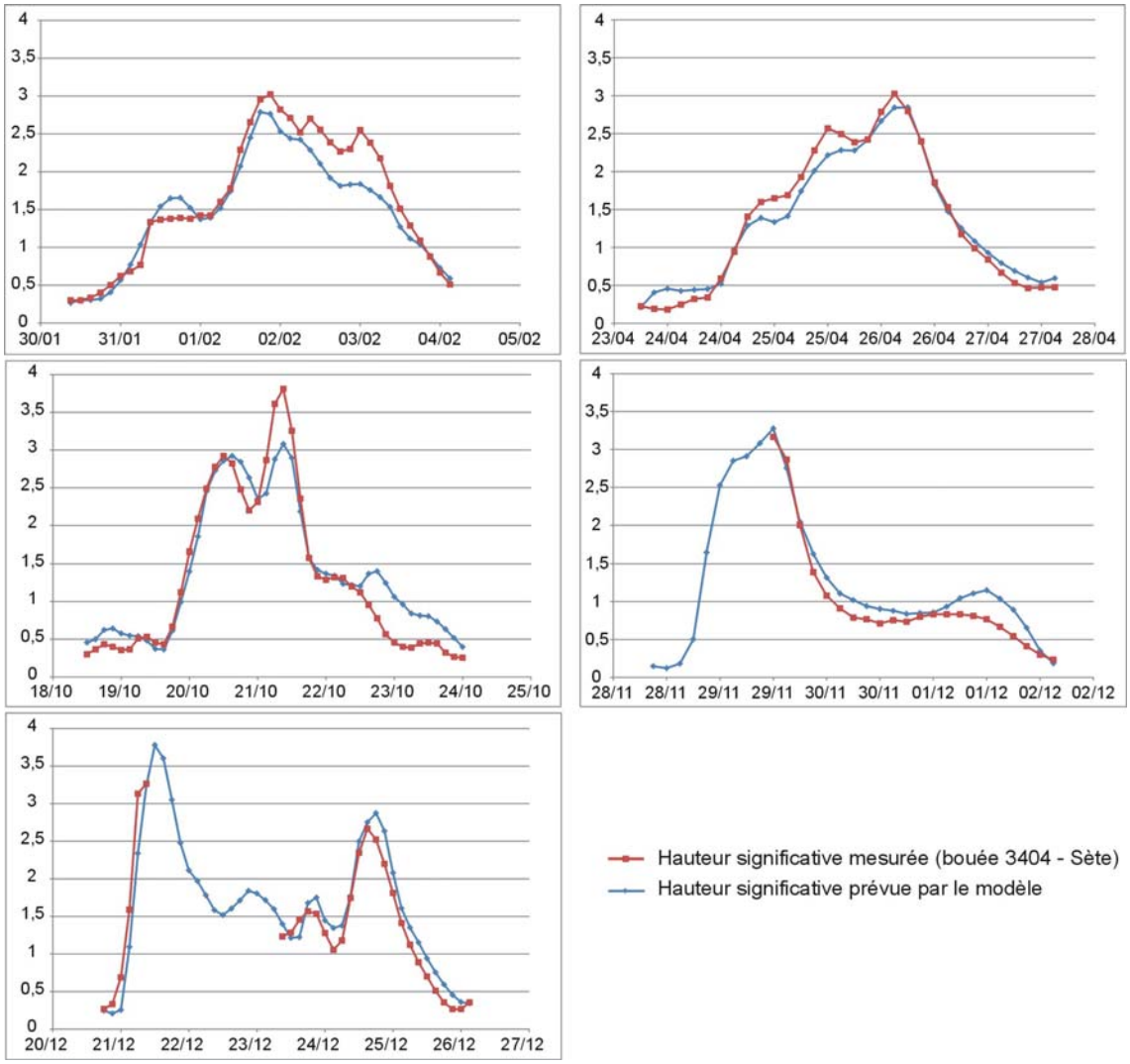


Illustration 25 – Comparaison des hauteurs significatives prédites par le modèles WW3-Méditerranée et mesurées à la bouéee 34004 au large de Sète (coups de mer de l'année 2009).

2.6.3. Bulletin d'alerte de Météo-France

Les alertes météorologiques sont réalisées par Météo-France qui diffuse des bulletins d'alerte, les BMS (Bulletins météorologiques spéciaux), ainsi que des bulletins côtier, large et grand large.

Pour le littoral du Languedoc-Roussillon, le bulletin côtier et celui de la bande des 20 milles entre Cerbère et Port Camargue (http://marine.meteofrance.com/marine/accueil?MARINE_PORTLET.path=marinecotebulletin/COTE_ESPA_CAMA).

Ce bulletin fait état d'un avis de tempête, de la situation du jour ainsi que les prévisions des états de mer jusqu'à 72 h et les tendances pour les 4 jours suivants.

Par ailleurs, un volet « vagues – submersions » de la vigilance météorologique est en préparation (prévu pour fin 2011). Cette extension spécifique de la carte de vigilance météorologique sera produite par Météo-France, en lien étroit avec le SHOM, à l'échelle du littoral de chaque département côtier. Pour chacun de ces départements, elle définira grâce au code couleur en vigueur un niveau de vigilance, en fonction des prévisions de niveau de mer et de hauteur des vagues relativement au large, ainsi que de critères caractérisant le danger de submersion sur les zones côtières les plus sensibles du département.

L'identification des points sensibles et la collecte des informations disponibles permettant de lier les hauteurs d'eau prévues à un niveau de danger pour ces points sont en cours, en liaison avec les services de l'État et des collectivités locales. L'action s'appuiera, pour la validation, sur l'extension des capacités d'observation en temps réel du réseau marégraphique du SHOM, en complément de ce qui est déjà entrepris dans le cadre de l'alerte aux tsunamis.

3. Faisabilité d'un réseau de suivi des tempêtes et de leurs impacts

L'objectif de la mise en place d'un réseau pour le suivi des tempêtes et de leurs impacts est d'assurer la collection des informations nécessaires sur les événements majeurs, tout en assurant une cohérence et une organisation pour assurer une meilleure mutualisation des moyens et des résultats.

La mise en œuvre de ce type de réseau repose sur la connaissance des seuils de tempêtes (hauteur de vagues, niveaux d'eau, vitesse du vent), la possibilité de mobilisation des différents acteurs, et la connaissance des actions entreprises par les membres du réseau afin d'assurer une collecte plus exhaustive d'informations, et d'éviter que plusieurs acteurs ne réalisent les mêmes suivis sur les mêmes territoires.

Dans les parties suivantes seront présentés un exemple de mise en réseau aux Etats-Unis, le recensement de l'existant en Languedoc-Roussillon et des préconisations de suivis lors et après les événements majeurs.

3.1. UN EXEMPLE D'ORGANISATION EN RESEAU : LE PLAN NATIONAL AMERICAIN POUR L'EVALUATION DES IMPACTS DES DESASTRES NATURELS

3.1.1. Contexte

Aux Etats-Unis, de nombreuses agences fédérales sont impliquées dans le suivi des conditions météorologiques, océanographiques des événements extrêmes (cyclones et tempêtes tropicales principalement), et dans le suivi des impacts morphologiques ou socio-économiques.

L'Office fédéral des services météorologiques et de la recherche associée (OFCM) est en charge de la coordination du plan national. L'objectif du plan est principalement d'éviter que les différentes agences impliquées fassent l'acquisition des mêmes informations et données. A titre de d'exemple, lors d'une tempête côtière, une agence va récupérer et analyser les informations de niveaux d'eau extrêmes pour l'évaluation du risque de submersion marine, et une seconde agence recense et analyse les mêmes données pour l'évaluation de l'efficacité des ouvrages de défense.

Le plan des opérations est formulé pour s'assurer que les procédures des différentes agences sont adaptées, tout en minimisant les ressources mobilisées par les différentes agences. De plus, le plan est organisé pour définir les besoins nécessaires en fonction du type d'événements. Il prend ainsi en compte des cyclones ou tempêtes

tropicales, des tempêtes extratropicales, des ouragans, des tsunamis et des crues des fleuves majeurs.

3.1.2. Participants

Les agences impliquées dans ce plan national sont nombreuses. On peut citer :

- Le NRCS (Natural resources Conservation Service) qui est en charge de l'amélioration de la résilience des ressources naturelles face aux aléas naturels (incluant le changement climatique) et qui assure un soutien financier aux particuliers dans cet objectif ;
- La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), principale agence météorologique gouvernementale ;
- Le NWS (National Weather Service) qui est constitué de multiples centres pour la prévision météorologique, prévision des tempêtes, prévision des tsunami, prévision du climat ;
- Le CSC (Coastal Service Center), chargé l'évaluation des aléas côtiers, le support et l'information des populations sur le littoral ;
- Le CO-OPS (Center for Operational Oceanographic Products and Services) en charge de la prévision des états de mer et niveaux d'eaux pour la navigation ;
- Le NGS (National Geodetic Survey) en charge de la cartographie et géodésie ;
- Le NIST (National Insitute of Standards and Technology) en charge de la standadisation des données, mesures et procédures de sécurité ;
- L'USACE (U.S. Army Corps of Engineers), en charge du génie civil côtier;
- Le DHS (Department of Homeland Security) et la FEMA (Federal Emergency Management Agency) en charge de la coordination, l'assistance pour la qualification des aléas, la formation pour la gestion de crise, …;
- L'USGS (U.S. Geological Survey) responsable de la collecte, l'analyse et la diffusion des données de géologie, topographie, ressources minérales, hydrologie et biologie ;
- Des organisations affiliées : l'AAWE (American Association for Wind Engineering), le COPRI (Coasts, Ocean, Ports and Rivers Institute) et le DHC (Digital Hurricane Consortium).

3.1.3. Critères d'activation du plan

L'implication des différentes agences dans le suivi des impacts est fonction de l'évènement lui-même et de l'intérêt que portent les agences aux données potentiellement collectées.

Pour les événements météorologiques pouvant être prédits, le système se déclenche automatiquement. Pour les événements difficiles à prédire (tsunami, tornades), l'alerte n'est pas possible et l'activation est donc basée sur des critères évaluant la probabilité

d'occurrence d'un événement. L'illustration 26 présente la liste des critères d'activation commune à toutes les agences concernées.

Critères d'activation du Plan
Prévision à 5j d'un ouragan pouvant impacter la côte
Surcote inhabituelle
Période inhabituelle et prolongée de hauts niveaux d'eau en zone côtière
Large portion de côte impactée
Période prolongée et/ou inhabituelle de fortes vitesses de vents
Périodes inhabituelles de vagues de longues périodes (> 16 s) dans le Golfe du Mexique
Fortes précipitations pouvant entrainer des inondations ou crues torrentielles
Tornades
Tsunami rapporté
Alerte tsunami basé sur les données sismiques
Rupture de digue ou fragilisation
Crues torrentielles

Illustration 26 - critères d'activation du plan d'évaluation des impacts.

3.1.4. Procédures de réponses

La coordination des agences est requise lorsque des activités communes sont prévues dans un même secteur géographique avec un besoin commun de données. L'illustration 27 présente un exemple de procédures mises en œuvre avant, pendant et après un événement majeur.

Procédures de réponses	Tempête tropicale	Extratropicale	Ouragan	Tsunamis	crues
Evénement -5j					
USGS : lancement du plan de réponse aux ouragans	X				
Evénement -3j					
NOAA : réalisation d'un vol Lidar pré-tempête	X				X
DHC : Coordination de la mise en place de capteurs sur site	X				
USGS, USACE, FEMA, NOAA : plans pour la mise en place coordonnée de capteurs pour l'estimation des niveaux d'eaux	X	X			X
NOAA CSC : Support cartographique pour la gestion de crise	X				X
NIST, NOAA, AAWE et DHC : plan pour la mise en place de capteurs, et la réalisation de l'évaluation des structures après l'événement	X	X			X
Evénement + 0j					
Toutes les agences : logistique proche de la zone impactée	X	X	X	X	X
NOAA NGS : plan pour les vols Lidar et photos post-tempête	X	X	X	X	X

Evénement + 1j					
Toutes les agences : levers post-tempête, vols, photographies des dommages, extension submersion, état des défenses côtières, …	X	X	X	X	X
NIST, NOAA, AAWE, DHC : coordination de l'évaluation des infrastructures	X	X	X	X	X
NWS : Déploiement d'équipe de réponse rapide	X	X	X	X	X
NOAA OCS : levers bathymétrique post-tempête	X				
USACE, USGS, FEMA, NWS : collaboration pour la collection de données sur l'inondation sur les sites prioritaires					X
Evénement + 3j					
USGS, USACE, FEMA : déploiement d'équipe pour collecter les marques de niveaux d'eau extrêmes (avant 72h si possible)	X				X

Illustration 27 – Procédures de réponse du Plan d'évaluation des impacts.

Ces procédures de réponses sont accompagnées de procédures d'acquisition de données fournissant des guides sur les procédures d'acquisition, le type et la quantité de données nécessaires. Ces guides méthodologiques sont fournis par l'USGS.

3.1.5. Récupération et mutualisation des données

Dans le plan américain, les données recueillies sont stockées par celui qui les collecte. Chacun des partenaires peut accéder aux données collectées via des liens internet spécifiques. Chaque fournisseur de données fournit la métadonnée, description de la donnée et de sa qualité, localisation du lieu de stockage, et ces informations sont centralisées sur un serveur commun http://www.ofcm.gov/wg-diap/index.htm

Lorsque la collection d'informations est terminée, le coordinateur OFCM collecte les fichiers et rédige le rapport-résumé sur l'événement et ses impacts.

3.1.6. Synthèse de l'exemple américain

Le plan d'évaluation des impacts des désastres naturels est un plan opérationnel et très structuré, coordonné par une agence du gouvernement fédéral. Il repose sur la coordination et la mutualisation des moyens entre différentes agences gouvernementales, Services régionaux et autres institutions affiliées.

Avantages

- Cette organisation repose sur des outils fiables de prévisions des événements ;
- Elle permet une récupération exhaustive des informations et données ;
- Les données sont mutualisées et utilisées pour des applications diverses des différents intervenants.

Inconvénients :

- Cette approche nationale ne peut se concentrer que sur les événements les plus extrêmes, et le suivi des événements plus localisé se fait à des échelles inférieures ;
- Le système repose sur des agences ou instutions dont les missions de suivi d'impacts sont clairement établies, de même que les procédures d'intervention ou d'astreinte, ce qui est difficilement transposable en France.

3.1.7. Autres exemples en Europe

En France, et en Europe, de telles organisations n'existent pas. Les systèmes existant ont des dimensions beaucoup plus locales qui s'appuient notamment sur les observatoires côtiers à échelle régionale.

C'est le cas du COBS (Coastal Observatory) en mer d'Irlande (http://coastobs.pol.ac.uk/) qui bénéficie d'un réseau de mesures océanographiques extrêmement dense, de modèles opérationnels éprouvés et d'un réseau d'acteurs locaux (communes ou collectivités de communes) réalisant des levers post-tempêtes très complets. La structure de l'observatoire fournit toutes les ressources nécessaires pour le suivi des tempêtes et de leurs impacts, et les données sont centralisées avec les données de suivis réguliers au BODC (British Oceanographic Data Center).

En France, l'Observatoire de la Côte Aquitaine réalise des suivis post-tempêtes qui s'appuie sur l'ensemble du réseau de l'OCA, et en particulier sur les gardes-forestiers ONF présents sur le littoral sableux et les agents BRGM sur la côte rocheuse basque et sur le Bassin d'Arcachon. Un suivi régulier des entailles d'érosion marine est effectué. Les agents de terrain de l'ONF qui effectuent ce levé sont particulièrement vigilants après une tempête ou une forte houle.

Il n'existe pas de système de déclenchement formalisé. En cas de tempête, le partenariat est alerté par le BRGM par mél et les informations obtenues par les différents partenaires sont centralisées. Le réseau des collectivités sait qu'il peut s'appuyer sur le BRGM et fait lui-même remonter des impacts et érosions importants qui peuvent faire l'objet d'un levé spécifique par le BRGM ou par l'un des partenaires.

Des initiatives régionales sont également réalisées par les services de l'Etat qui centralisent les données océanographiques et météorologiques et peuvent mobiliser des moyens sur le terrain ou pour des photographies aériennes des dommages. Un exemple de la ce type d'action sera présenté dans la partie suivante.

3.2. RECENSEMENT DE L'EXISTANT EN LANGUEDOC-ROUSSILLON

Bien que la surveillance des tempêtes ne fasse pas aujourd'hui l'objet d'un dispositif homogène et généralisé sur l'ensemble du territoire régional, différentes initiatives existent de manière plus ou moins structurées. Afin de recenser ces initiatives, les

acteurs publics sur le territoire régional ont été consultés et les démarches les plus importantes sont présentées ci-après.

3.2.1. Organismes consultés

Conformément au cahier des charges, cette étude s'est attachée aux seuls acteurs de la sphère publique (services de l'Etat, Collectivités, organismes publics) susceptibles de réaliser des observations pendant ou après les tempêtes en Languedoc-Roussillon.

Ce recensement a concerné :

- la DREAL (Service Risque – DYSAC) ;
- les Délégations de la Mer et au Littoral (en partie recomposées à partir des ex-services maritimes du SMNLR) des DDTM de chaque département ;
- le Conseil Régional (Services Risque et Ports)
- les Conseils Généraux ;
- les collectivités intercommunales littorales ;
- l'EID-Méditerranée.

L'étude a également utilisé les résultats d'une consultation des communes littorales de la Région réalisée en 2008 dans le cadre de la « BD Tempêtes » du projet de recherche européen MICORE (Impacts morphologiques et risques côtiers induits par les événements de tempête extrêmes).

3.2.2. Dispositifs existants

La consultation de ces organismes a permis d'identifier un certain nombre d'actions entreprises pour le suivi des tempêtes et de leurs impacts.

Parmi les actions réalisées, deux dispositifs opérationnels structurés et à l'échelle du territoire régional existent. Il s'agit des procédures mises en œuvre par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement (DREAL LR) avec le soutien des Délégations à la mer et au Littoral (DML) et par l'EID-Méditerranée. Ces deux procédures sont présentées ci-après.

Des observations éparses peuvent occasionnellement être réalisées par les capitaineries de ports (échelles limnimétriques sur certains quais ou canaux par exemple) ou agents de terrain (services communaux, gardes-digues, etc.) mais elles restent sporadiques et ponctuelles. Leur déclenchement tient davantage de l'initiative personnelle que d'une réelle procédure.

Suivi DREAL / DML

Le schéma suivant résume le dispositif DREAL / DML (cf. Illustration 28) :

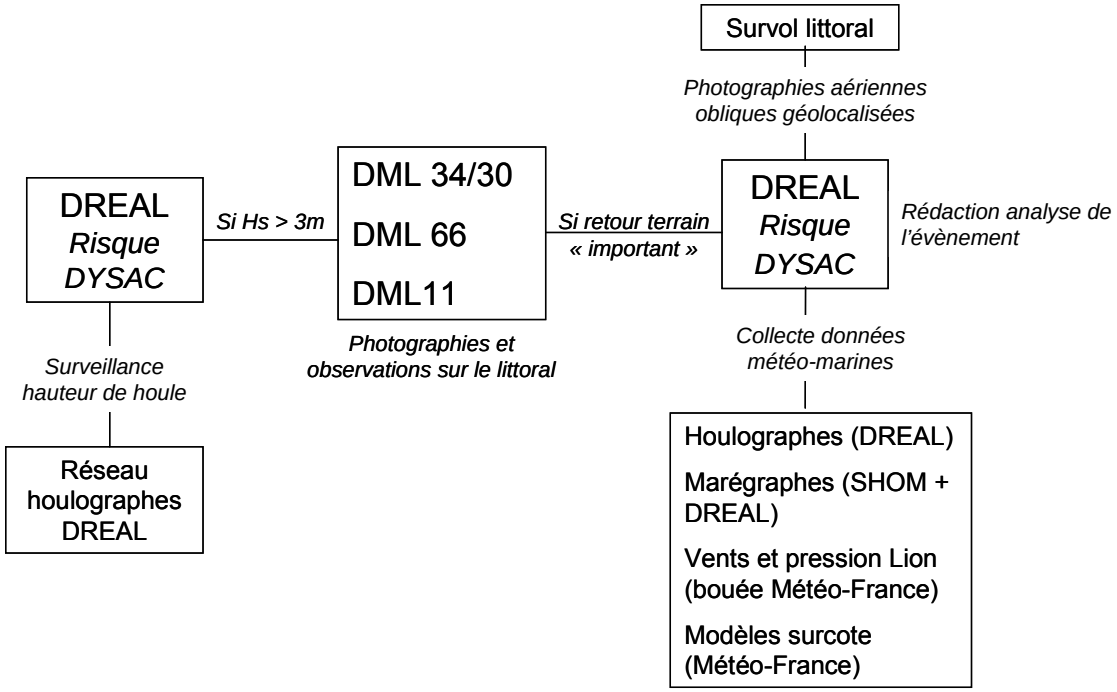


Illustration 28 – Dispositif de surveillance des tempêtes DREAL / DML

Le service Risque de la DREAL dispose d'un réseau de quatre houlographes disposés sur l'ensemble de la Région (Banyuls, Leucate, Sète, Espiguette) dont il collecte les données en continu. Ces données sont visionnées régulièrement et lorsque les hauteurs de vagues atteignent une importance notable (en général à partir de 3m), la DREAL demande aux DML des observations de terrain dans chaque département, essentiellement sous la forme de photographies du littoral (plages, fronts de mer, impacts éventuels).

Lorsque la tempête est « importante », la DREAL collecte en outre les données météo-marines correspondantes (vents, pression, houle, niveaux d'eau et surcote). Les données de houle sont celles issues du réseau DREAL. Les données de niveaux d'eau sont issues des deux marégraphes numériques du SHOM (Sète et Port Vendres - BD RONIM) et d'une station test de la DREAL à Port-Camargue. Une convention entre la DREAL et Météo-France permet de récupérer les données de vents et de pression de la bouée LION située au large dans le Golfe du Lion ainsi que les sorties de modèles de surcote de Météo-France (CEP, ALADIN et ARPEGE) au niveau des marégraphes.

Un survol du littoral peut être également déclenché afin de réaliser des photographies aériennes obliques qui sont géolocalisées sur SIG (récemment au moyen d'un GPS intégré produisant un fichier exif contenant les coordonnées du lieu de la prise de vue).

Sur la base des observations de terrain et des données météo-marines, la DREAL rédige un rapport sur l'évènement disponible sur internet (ex : analyse de la tempête d'octobre 2010[3]).

Suivi EID

Le service littoral de l'EID-Méditerranée réalise également une surveillance des tempêtes (Illustration 29).

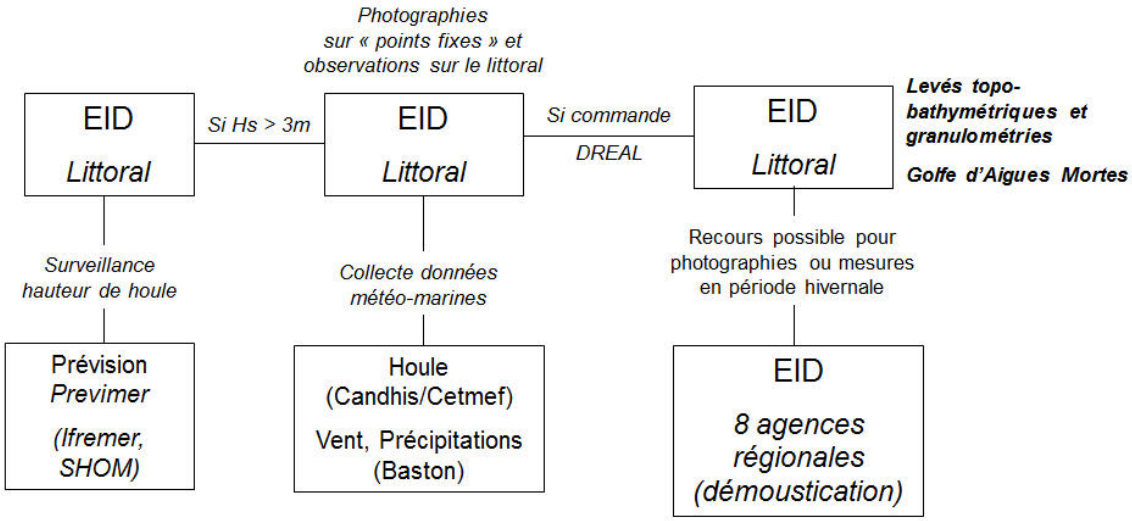


Illustration 29 – Dispositif de surveillance des tempêtes de l'EID

En cas de « forte houle » prévue par Previmer, l'EID-Méditerranée effectue des photographies sur le terrain, récolte des données météo-marines et peut engager des mesures topo-bathymétrique de la plage.

Les photographies du littoral sont réalisées selon un réseau de « points fixes », c'est-à-dire de zones de prises de vue identiques à différentes dates. Ces points fixes sont choisis en raison de la vulnérabilité connue du secteur, de l'accessibilité en période de tempête et de la « repérabilité » de la zone de prise de vue (des repères facilement identifiables assurent à la fois une meilleure appréciation de la tempête sur l'image et facilitent la localisation de la photographie par un nouvel intervenant pour assurer une pérennité de la méthode).

Des données météo-marines sont également collectées sur les différentes bases de données publiques disponibles sur internet. Les données de houle proviennent de

[3] http://www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=1639

Candhis[4] (Cetmef), celles de vent et de précipitation des stations du réseau Baston[5] (site de windsurf).

A la demande de la DREAL, des levés topo-bathymétriques sont réalisés sur les plages du Golfe d'Aigues-mortes, de Palavas les flots jusqu'au Grau du Roi. Ces profils topo-bathymétriques post-tempêtes de la plage aérienne et sous-marines (pas de coupure du profil) sont conduits dans les 2 semaines après l'événement, délais au-delà duquel l'impact de la tempête sur la morphologie de la plage est considéré comme « amorti ». Compte-tenu de ce laps de temps et du linéaire couvert (environ 15 km), les levés concernent environ une centaine de profils. Des prélèvements sédimentologiques et des analyses granulométriques sont également réalisés sur ces profils.

Dans l'ensemble, la zone d'intervention concerne donc essentiellement l'Hérault. Il est en outre à noter que les 8 agences opérationnelles réparties sur le territoire régional peuvent être sollicitées hors période de démoustication (c'est-à-dire en période hivernale, soit la plus propice aux tempêtes) afin de participer à des observations voire des mesures de terrain.

3.2.3. Apports et limites

Ces deux dispositifs de surveillance des tempêtes présentent, tout d'abord, l'avantage de reposer sur une organisation d'une part centralisée pour la collecte de l'information et l'analyse de l'évènement et d'autre part sur des agents de terrain mobilisables sur l'ensemble du littoral régional (DML et agences opérationnelles de l'EID) en cas d'évènement.

En outre, les actions conduites sont complémentaires, l'apport évident de l'EID vis-à-vis du dispositif de la DREAL étant la réalisation de levés topo-bathymétriques.

Enfin, le recours à un suivi « léger » (photographies et observations) ou plus « complet » (survol, profils de plage) suivant l'importance de l'évènement semble tout à fait pertinent.

Les deux dispositifs présentent toutefois des redondances, notamment sur la récupération et l'analyse des données océanographiques et météorologiques des événements. Une mutualisation des moyens sur cette collecte pourrait donc être envisagée.

Dans les deux cas, les seuils de déclenchement des suivis (tempête ou pas, tempête importante ou pas) sont arbitraires ou évalués au cas par cas. De plus, la veille des hauteurs de vague n'est pas automatisée ce qui, en l'absence d'astreinte, peut

---

[4] http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/

[5] http://www.winds-up.com/

conduire à retarder le déclenchement du suivi voire à occulter des évènements (typique au moment des fêtes de fin d'année).

Par ailleurs, une homogénéisation des données recueillies et une généralisation sur l'ensemble du territoire régional semblent souhaitables avec un intérêt particulier apporté aux impacts, c'est-à-dire aux morphologies plages-dunes et aux dégâts sur les infrastructures. Enfin, la mutualisation des procédures et des informations recueillies reste à mettre en place pour une meilleure efficacité du suivi de l'impact des événements.

3.2.4. Autres dispositifs

Le recensement effectué a permis d'identifier d'autres dispositifs à des échelles spatiales plus localisées.

Ainsi, les deux ports régionaux de Sète et Port-La-Nouvelle, de par leurs activités, réalisent un certain nombre d'observations lors ou après les événements. Sont relevés notamment les niveaux d'eaux atteints (marégraphe SHOM à Sète et échelle de marée à Port-La-Nouvelle). Un état des lieux est réalisé après chaque événement important dans le port (bateaux) et en cas de dégâts, une ronde est réalisée sur tous les ouvrages. De manière plus ponctuelle, des photographies sont réalisées pendant la tempête (à distance) permettant notamment d'obtenir des informations sur le franchissement des ouvrages.

Le Conseil Général de l'Hérault met en œuvre un suivi topobathymétrique annuel des différentes cellules hydrosédimentaires du département ainsi qu'un suivi des évènements de tempêtes (maitrise d'œuvre EID). En outre, des travaux de modélisation dans le cadre du projet *Coastance* sont en cours avec comme objectif de quantifier l'élévation instantanée du niveau d'eau et de la submersion pour déterminer les secteurs vulnérables du cordon dunaire. Enfin, à l'échelle des communes, un système vidéo est implanté à Valras-Plage et des contrôles réguliers de dégradations d'ouvrages et de travaux de réhabilitation sur le terrain sont réalisés.

A l'échelle intercommunale, les agglomérations de Thau, Béziers et Perpignan développent des initiatives dans ce sens avec la mise en place d'observations via une station vidéo sur le lido de Sète à partir du second trimestre 2011 (maitrise d'œuvre BRGM) et un observatoire du littoral à l'étude sur le territoire de PMCA (Perpignan Méditerranée Communauté d'Agglomération).

3.3. DISPOSITIF DE DECLENCHEMENT DU SUIVI

Les seuils d'impacts et seuils morphogènes sont décrits dans la partie 2.5. Sur la base de cette analyse des événements historiques, on peut proposer différents seuils pour le déclenchement du suivi.

Le critère de hauteur de vagues semble être le mieux corrélé avec l'ampleur des réponses morphologiques et des impacts. Pour une hauteur significative des vagues

au large atteignant 3 m (seuil 1), on observe la mobilité des morphologies et l'inondation partielle de la plage ; lorsque les vagues atteignent 4 m (seuil 2), le front dunaire peut être localement attaqué et les plages inondées ; pour des vagues dépassant 5 m (seuil 3), des franchissements commencent à être observé sur les zones basses qui font face à la houle.

Ces conditions sont générées par des flux de Sud-Est ou des flux d'Est (entre la Corse et le continent) qui vont pénétrer dans le Golfe du Lion et impacter respectivement le nord du Golfe (Hérault, Gard) et le Roussillon.

L'évaluation des modèles prévisionnels a montré que certains des modèles prévisionnels de vents (type GFS) et de vagues (WW3 méditerranée de Previmer) sont particulièrement performants et peuvent être utilisés pour le déclenchement du suivi tempête.

Toute la problématique est d'automatiser le processus de veille afin que le déclenchement du réseau de suivi puisse avoir lieu y compris la nuit, les fins de semaines ou les périodes de vacances (typiquement entre Noël et le jour de l'an) afin d'assurer la mobilisation des personnes éventuellement disponibles.

Dans le cadre du projet MICORE, une automatisation de la lecture des sorties du modèles prévisionnel WW3 a été mise en place pour le secteur de Sète, afin d'utiliser ses données de vagues dans le simulateur de réponses morphologiques. De tels outils devront être mis en place en plusieurs points du Golfe du Lion pour extraire les prévisions, lire automatiquement les hauteurs de vagues et générer les messages automatiques lorsque les seuils préétablis sont franchis.

3.4. INDICATEURS ET METHODES DE SUIVI

La surveillance des tempêtes doit permettre de mieux appréhender l'occurrence, les aléas et la vulnérabilité qui en découlent.

Pour cela, différents indicateurs et leurs méthodes de suivi sont proposés, notamment sur la base des dispositifs existants.

3.4.1. Indicateurs à prendre en compte

Les deux principaux types d'indicateurs à appréhender sont :

- les conditions météo-marines d'une part ;
- et les impacts d'autre part.

Le tableau suivant détaille les informations à acquérir au sein de ces deux grandes catégories (Illustration 30) :

Conditions météo-marines	Impacts
Vent	Position du trait de côte
Pression atmosphérique	Morphologie plage-dune
Précipitations	Dégâts sur les infrastructures (ports, fronts de mer, etc.)
Houle (Hs au large, run-up/franchissement à la côte)	Victimes
Niveaux d'eau (surcote)	

Illustration 30 – Synthèse des indicateurs à suivre lors d'une tempête

Conditions météo-marines

D'un point de vue météorologique, c'est la vitesse du vent qui définit le passage à une tempête. Le vent est rarement responsable directement d'impacts importants à la côte mais il agit sur la houle et la surcote selon sa vitesse et sa direction. Dans le Golfe du Lion, la durée d'action du vent marin est également à prendre en compte car elle va conditionner la génération d'une houle « formée », c'est-à-dire avec des périodes plus longues, ce qui joue un rôle important sur le phénomène de submersion.

La pression atmosphérique permet de qualifier la dépression (plus une dépression est creuse et moins la pression est forte[6]) et agit sur la surcote (le plan est surélevé d'1 cm pour 1hPa de moins).

Les précipitations constituent un indicateur complémentaire en cas d'inondation terrestres (débordement des étangs, crues des cours d'eau, ruissellement urbain) qui peuvent être concomitantes et aggravantes pour les submersions marines, notamment en ce qui concerne la capacité d'évacuation de l'eau par les réseaux urbains ou les systèmes naturels.

La houle est responsable de la plupart des dégâts à la côte. L'énergie de la houle peut être appréciée à partir de ses caractéristiques de hauteur significative (Hs) et de période (T) au large. Le *run-up* (altitude atteinte par la mer sous l'effet du jet de rive) et le franchissement des ouvrages sont des indicateurs de l'impact que peut avoir la houle sur le littoral (inondation, érosion, destructions).

Les niveaux d'eau marégraphiques dans les ports donnent une appréciation de la surcote en corrélation avec la marée astronomique et le *set-up* (surcote liée au déferlement de la houle).

[6] On parle de « dépression » en dessous de 1015 hPa et d'anticyclone au dessus de ce seuil.

Impacts

L'impact de la tempête est à suivre tout d'abord sur la plage qui constitue d'une part une protection naturelle pour les enjeux situés en arrière et d'autre part un espace à forte valeur économique et touristique. Il peut être marqué par la position du trait de côte et les variations morphologiques de la plage (croissants, berme, barres) et de la dune (front de dune, brèches).

L'impact sur les biens (infrastructures portuaires et urbaines) et les personnes est enfin à apprécier.

3.4.2. Méthodes de suivi

Le tableau suivant synthétise les méthodes de suivi adaptées aux indicateurs (Illustration 31) :

Indicateurs	Méthodes de suivi
Conditions météo-marines	
Vent, Pression, Précipitations	Collecte mesures Météo-France Station LION + stations à terre.
Houle (au large, à la côte)	Collecte mesures bouées DREAL Observations de terrain (formulaire) Photographies « points fixes » Sorties de modèles et caméras vidéo
Niveaux d'eau (surcote, inondations)	Collecte mesures marégraphes SHOM + DREAL Photographies « point fixes » (dont échelles limnimétriques, laisse de mer, secteur inondé) et aériennes Point GPS (à main) Caméra vidéo
Impacts	
Position du trait de côte et morphologie plage-dune	Observations de terrain (formulaire) Photographies post-tempêtes (terrestres et aériennes) Levés topo-bathymétriques Caméra vidéo
Dégâts sur les infrastructures (ports, fronts de mer, etc.)	Observations de terrain (formulaire) Photographies post-tempêtes (terrestres et aériennes)
Victimes	Rapport Préfecture/Protection civile Presse

Illustration 31 – Synthèse des méthodes de suivis des tempêtes

Collecte des enregistrements des réseaux de mesure

La récolte des données météo-marines peut de manière générale reprendre celle réalisée par la DREAL (houlographes, marégraphes, bouée LION – cf. 3.2.2) car elle s'appuie sur des organismes (Météo-France ; SHOM ; CETMEF) et réseaux de mesure produisant des données « de référence ».

En ce qui concerne les données météorologiques, les mesures de stations terrestres de Météo-France ou autres stations (Baston.fr, Meteociel) réparties sur le littoral régional (Sète, Béziers, Vias, Leucate, Cap Bear, …) pourraient en outre être collectées, notamment les données de précipitations et de pression atmosphérique.

Le cas échéant, les possibilités de diffusion de ces données au sein du réseau « tempête » devront être précisées (données Météo-France).

Résultats de modélisation

Les modèles de surcote de Météo-France (cf. 3.2.2) offrent des informations précieuses sur les niveaux d'eaux.

Par ailleurs, les développements en cours dans le cadre de Prévimer visent à implanter un modèle opérationnel pour l'estimation des niveaux d'eau. Celui-ci devrait être mis en place en 2011. Il sera utile à la fois à l'activation du réseau (secteurs sur lesquels les surcotes prévues sont importantes) et à l'analyse des observations de niveau et d'inondation sur le terrain.

Observations de terrain

- **Observations qualitatives (formulaire de terrain)**

Des observations qualitatives peuvent être réalisées sur le terrain sur des secteurs affectés par une tempête. Des secteurs régionaux à observer de manière systématique (« points fixes ») devront pour cela être définis. Des observations complémentaires pourront être réalisées si d'autres secteurs sont touchés par la tempête.

L'observation des indicateurs nécessitent une visite pendant (dans la mesure de l'accessibilité et en fonction de la dangerosité de l'évènement) et après la tempête.

Afin d'homogénéiser ces observations, un formulaire est proposé en Annexe 3. Il reprend de manière simplifiée les indicateurs précités (conditions de mer, impacts sur la plage et les infrastructures).

Les observations sur les limites atteintes par la mer ainsi que les dégâts engendrés sont cruciales pour la validation des cartographies des aléas côtiers.

Le formulaire indique également lorsque des photographies et points GPS sont souhaitables (voir méthode ci-après).

- **Photographies terrestres et aériennes**

Les photographies apportent un témoignage visuel des conditions et impacts de la tempête.

En ce qui concerne les photographies « terrestres », le principe du « point fixe » tel que pratiqué par l'EID est à retenir (cf.3.2.2). Ces photographies sont à réaliser conjointement aux observations renseignées sur le formulaire de terrain. Un réseau de points fixes régionaux est donc à établir.

Comme pour les observations sur formulaire, les photographies doivent être réalisées pendant et après la tempête. Dans l'idéal, une photographie avant le montant de la tempête peut compléter ces prises de vue.

Pour les photographies produites sur des secteurs complémentaires aux points fixes, il convient de les localiser, au minimum en indiquant la toponymie dans le nom du fichier, au mieux en les géolocalisant sur SIG comme cela est fait pour les photographies aériennes de la DREAL.

Le déclenchement de survols aériens post-tempête suite à un évènement majeur (typiquement pour Hs >5m) constitue une démarche à conserver. L'utilisation d'un GPS intégré à l''appareil photographique reste le meilleur moyen de géolocaliser les lieux de prise de vue.

Mesures de terrain

En complément des observations sur le formulaire et des photographies terrestres, des points géoréférencés pourraient être relevés au moyen d'un GPS « à main », peu couteux et facile d'utilisation.

La précision métrique de ces points GPS serait suffisante pour localiser jusqu'où la mer est montée (laisse de mer) ou jusqu'où elle a inondé le secteur.

En cas d'évènement majeur (Hs >5m), le principe des levés topo-bathymétriques post-tempêtes comme ceux opérés par l'EID doit être maintenu (cf. 3.2.2).

Il serait en outre, intéressant d'étendre ces levés au reste du littoral régional, en choisissant par exemple des secteurs fixes et/ou des secteurs complémentaires selon l'impact de la tempête.

Les modalités (nombre de sites, localisation, intervenants, etc.) d'une telle opération devront être discutées par les partenaires CPER.

3.5. PROCEDURE DE SURVEILLANCE DES TEMPETES EN LANGUEDOC-ROUSSILLON

3.5.1. Réseau d'acteur susceptible de réaliser le suivi

Dans un premier temps afin de faciliter le démarrage de ce dispositif, il est proposé de se limiter aux acteurs et moyens existants identifiés précédemment.

Le principe est donc de coordonner les dispositifs existants au sein d'une seule procédure généralisée à l'échelle régionale et standardisée dans ses méthodes et indicateurs de suivi.

Les organismes concernés sont les suivants :

- DREAL Languedoc-Roussillon (Service Risque – DYSAC) ;
- DML 34/30 ; 66 et 11 ;
- EID Méditerranée (Service Littoral et agences opérationnelles) ;
- BRGM (Service Géologique Régional Languedoc-Roussillon) ;
- Conseil Régional Languedoc-Roussillon (Service Risque et Ports régionaux) ;
- Conseil Général de l'Hérault ;
- Thau Agglo ;
- Perpignan Méditerranée Communauté d'Agglomération ;
- Communauté d'Agglomération Béziers Méditerranée.

Dans une phase ultérieure, ce réseau d'acteur pourra être étoffé par de nouveaux intervenants (autre collectivités et organismes avec une sollicitation notamment des agents communaux, gardes-digues, clubs de sports nautiques, etc.) en fonction du retour d'expérience du réseau mis en place initialement.

3.5.2. Proposition de procédure

En se basant sur les seuils de déclenchement et les méthodes de suivi présentés précédemment une procédure générale de suivi des tempêtes peut être proposée (Illustration 32) :

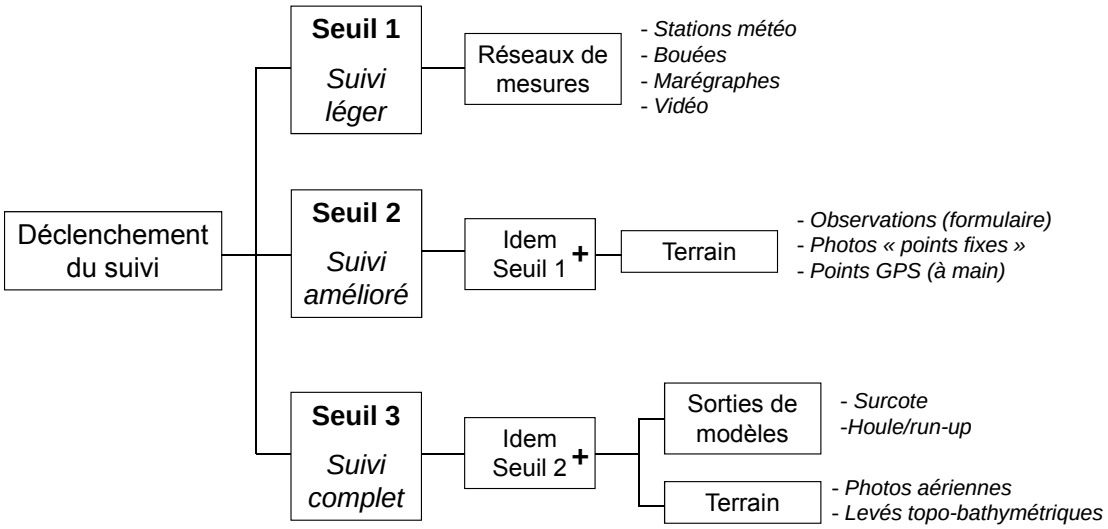


Illustration 32 – Procédure de suivi de tempête

Cette procédure distingue trois types de suivi, à savoir un suivi léger déclenché par le seuil 1 de tempête (Hs >3m) ; un suivi amélioré correspondant à un seuil 2 (Hs >4m) et un suivi complet déclenché par seuil 3 (Hs >5m).

Le seuil 1 déclenche la collecte des enregistrements des réseaux de mesures Météo-France ; SHOM ; DREAL et des stations vidéo.

Le seuil 2 active en outre une intervention sur le terrain limitée à des observations sur formulaires, des photographies terrestres et des points GPS sur les points fixes.

Le seuil 3 déclenche en plus la collecte des sorties de modèles (surcote et houle) et des levés complémentaires sur le terrain avec un survol pour des prises de vues aériennes géoréférencées et un levé topobathymétrique de la plage.

4. Conclusion

La méthodologie mise en œuvre a permis en premier lieu de caractériser les tempêtes marines dans le Golfe du Lion (flux de Sud-Est et d'Est) et de déterminer, en fonction du critère de hauteur de vague, les seuils morphogènes et seuils d'impacts suivants :

- Hs = 3m : mobilité de morphologies et inondation partielle de la plage ;
- Hs = 4m : inondation de la plage et érosion du front dunaire ;
- Hs ≥ 5m : franchissement dans les zones basses faisant face à la houle.

En outre, à partir d'exemples internationaux et nationaux, la faisabilité d'un réseau de suivi des tempêtes est étudiée. Les acteurs régionaux du littoral ont pour cela été consultés sur leurs initiatives propres (suivis Etat ; EID ; Conseil Général de l'Hérault ; ports régionaux ; Agglos,…) et une première liste d'intervenants est définie.

Sur la base des démarches existantes, un dispositif de suivi homogène des tempêtes est proposé à l'échelle régionale. Il s'appuie sur la collecte d'indicateurs selon des méthodes de suivi et une procédure distinguant trois types d'intervention selon les seuils de déclenchement :

- Seuil 1 (Hs= 3m) : « suivi léger » avec collecte des enregistrements de réseaux de mesures (stations météorologiques, houlographes, marégraphe, stations vidéo) ;
- Seuil 2 (Hs =4m) : « suivi amélioré » avec en sus des indicateurs de seuil 1, une collecte rapide d'observations de terrain (formulaire de terrain, photos dites de « points fixes » et points GPS « à main ») ;
- Seuil 3 (Hs ≥ 5m) : « suivi complet » avec en sus des indicateurs de seuil 2 une collecte de sorties de modèle de surcote et de houle et des levés de terrain complémentaires (photographies aériennes obliques géoréférencées et levés topobathymétriques).

Le passage à un réseau opérationnel pourra se faire :

- en automatisant d'une part l'activation du réseau par un mèl à destination des intervenants en se basant sur les sorties du modèle Previmer en différents points du Golfe du Lion ;

- et en coordonnant d'autre part, l'action de différents participants ; la mutualisation et la valorisation des observations à l'échelle régionale.

Bibliographie

Armaroli, C. Balouin, Y., Ciavola, P. and Capatti, D., 2005 – Nearshore bars as a natural protection of beaches, field evidences from Lido di Dante Beach, Adriatic Sea. ICCM2005, Tavira, Portugal, 10 p.

Balouin, Y., Belon, R., Le Cozannet, G. et Gervais, M., 2009. Review of climate change impacts on storm occurrence along the French Mediterranean coast. MICORE Report D1-4, Editors: Ferreira, O., Voudouskas, M. and Ciavola, P., p37-43.

Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen (1999). A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. J. Geophys. Res., 104, C4, 7649-7666.

Certain, R., 2002 – Morphologie d'une côte sableuse microtidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc-Roussillon). Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan en océanologie/géologie, 209 p.

Ferreira, Ó., 2005 – Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. Journal of Coastal Research, SI42:221-227.

Gervais, M., Balouin, Y. Belon, R., 2011. Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lion Coastline, France. In press of Geomorphology, S.I. storm threshold in Europe.

Mendoza, E. T., 2008 – Coastal Vulnerability to Storms in the Catalan Coast. Thèse de Doctorat pour l'Universitat Politécnica de Catalunya, 192 p.

Morellato, D. et Benoit,M., 2009. Construction d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises méditerranéennes par simulation rétrospectives couvrant la période 1979-2008. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Hammamet, Tunisie, 2009. P. 147-150.

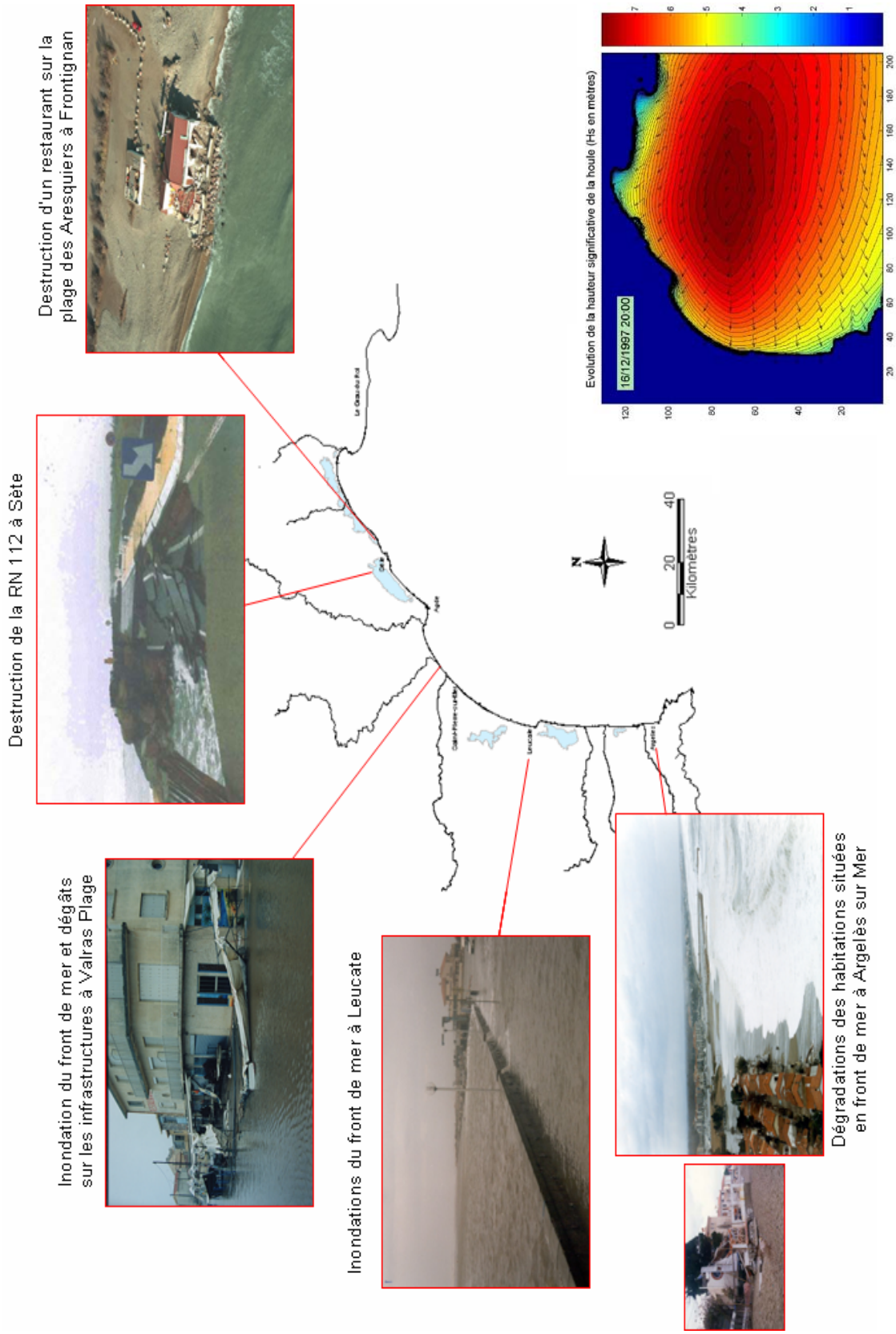
Saha, Suranjana, and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015–1057.

Sallenger, A.H., 2000 – Storm impact scale for barrier islands. Journal of Coastal Research. 16 (3), 890-985.

Tabeaud, M., 1995 – Les tempêtes sur les côtes méditerranéennes françaises. In: Annales de Géographie. 1995, t. 104, n°584. pp. 389-401.

Annexe 1

Illustration des dégats occasionnés lors de la tempête de décembre 1997



Sources photographiques : DRE_LR

Annexe 2

Présentation des évènements de tempêtes recensés dans la base de données tempêtes et modélisés avec le modèle SWAN (CFSR)

Evénement	Année	Mois	Tempête
1	1979	janvier	18 au 20/01/1979
2	1982	novembre	06 au 11/11/1982
3	1984	novembre	08 au 09/11/1984
4	1986	janvier	30 au 31/01/1986
5	1986	février	26 au 28/02/1986
6	1986	octobre	12 au 13/10/1986
7	1987	octobre	10/10/1987
8	1987	décembre	03 au 05/12/1987
9	1989	novembre	16 au 20/11/1989
10	1989	mars	06 au 08/03/1989
11	1995	janvier	17 au 19/01/1995
12	1995	novembre	21 au 23/11/1995
13	1996	janvier	21 au 23/01/1996
14	1996	janvier	28/01/1996
15	1996	février	03 au 04/2/1996
16	1996	décembre	08 au 14/12/1996
17	1997	octobre	28 au 30/10/1997
18	1997	novembre	06 au 07/11/1997
19	1997	décembre	16 au 18/12/1997
20	1998	décembre	30 au 31/12/1998
21	1999	novembre	12 au 13/11/1999
22	2000	décembre	21 au 23/12/2000
23	2001	janvier	29/01/2001
24	2001	novembre	10 au 11/11/2001
25	2001	novembre	15 au 17/11/2001
26	2002	janvier	20 au 22/01/2002
27	2002	avril	11/04/2002
28	2002	septembre	08 au 12/09/2002
29	2002	novembre	21/11/2002
30	2002	décembre	10 au 12/12/2002
31	2003	février	25 au 27/02/2003
32	2003	février	28/02/2003
33	2003	octobre	04 au 07/10/2003
34	2003	décembre	01 au 05/12/2003
35	2004	février	20/02/2004
36	2004	mars	29/03/2004
37	2004	avril	15 au 17/04/2004
38	2004	août	16 au 17/08/2004
39	2007	novembre	19 au 22/11/2007
40	2008	janvier	02 au 04/01/2008
41	2008	avril	20/04/2008
42	2008	novembre	01 au 03/11/2008
43	2008	décembre	26 au 27/12/2008
44	2009	février	30/01/2009 au 04/02/2009
45	2009	avril	24 au 27/04/2009
46	2009	octobre	20 au 22/10/2009

Annexe 3

Formulaire d’observations de terrain

OBSERVATIONS TEMPETES

Date et heure :
Lieu (commune, secteur) :

	Prendre* une PHOTO	Prendre* un point GPS
Pendant la tempête :		
La mer recouvre-t-elle toute la plage ?	☐	
Les vagues franchissent-elles la dune/le front de mer/les quais ?	☐	
Si oui, jusqu'où ?		
S'il existe une échelle limnimétrique (hauteur d'eau) sur un quai la prendre en photo.		
Des infrastructures (port, constructions, etc.) sont-elles exposées ?	☐	
Si oui, lesquelles ?		
Après la tempête :		
Un départ de sable est-il apparent sur la plage/dune ?	☐	
Une laisse de mer** est-elle apparente sur la plage/dune, en ville ?	☐	☐
Les vagues ont-elles causé des dégradations sur les infrastructures ?	☐	
Si oui, sur lesquelles ?	☐	☐
Y a-t-il eu des inondations par la mer ?	☐	
Si oui, jusqu'où à l'intérieur des terres ?	☐	☐

** Cocher la case lorsque que la photo et/ou le point GPS ont pu être faits.*
*** ligne de déchets naturels et anthropiques déposés par la mer.*

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Languedoc-Roussillon
1039, rue de Pinville
34000 Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80