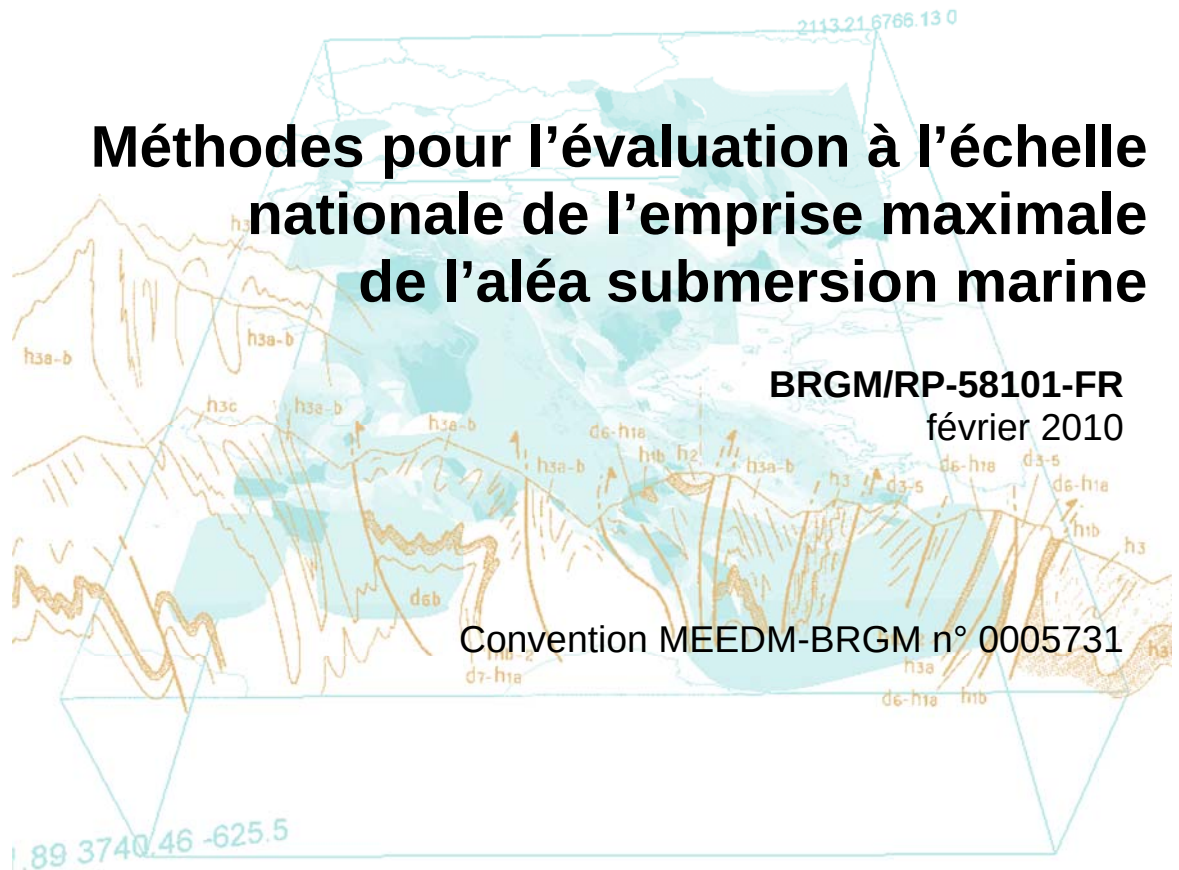




Méthodes pour l'évaluation à l'échelle nationale de l'emprise maximale de l'aléa submersion marine

BRGM/RP-58101-FR
février 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2009-2010 – 09LIT14
Convention MEEDDAD-BRGM n° 0005731

Y. Krien, M. Garcin
avec la participation de
R. Pedreros, G. Le Cozannet

Vérificateur :
Nom : C. Oliveros
Date : 02/04/2010
Signature :
(Ou Original signé par)

Approbateur :
Nom : H. Modaressi
Date :
Signature :
(Ou Original signé par)

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.

Mots clés : Submersion marine, Méthodologie, France, Modélisation, Tempêtes, Aléa.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Krien Y., Garcin M., Pedreros R., Le Cozannet G. (2010) – Méthodes pour l'évaluation à l'échelle nationale de l'emprise maximale de l'aléa submersion marine. Rapport BRGM/RP-58101-FR, 88 p, 28 fig., 4 tabl.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les côtes européennes présentent de forts enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Les importants dégâts provoqués ces dernières années par des inondations marines lors de tempêtes ou de cyclones indiquent une grande vulnérabilité à ces phénomènes. Le Parlement européen et le Conseil de l'Union Européenne ont donc publié une Directive (2007/60/CE) invitant, entre autres, les États membres à réaliser une évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI) sur l'ensemble des zones côtières.

Le MEEDDM (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer) a sollicité le BRGM dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive EPRI pour proposer des méthodes permettant d'évaluer les emprises et la qualification de l'aléa submersion marine actuel sur le littoral de la France métropolitaine et des Départements d'Outre-Mer.

L'étude comporte une première partie d'analyse critique comparative des principales méthodes utilisées en France et à l'étranger. Dans la seconde partie des propositions de méthodes pour évaluer l'aléa submersion marine à l'échelle nationale sont proposées.

1 - Les approches développées en France se caractérisent par des échelles d'application souvent locales. Elles s'inspirent très largement des recommandations du « *Guide Méthodologique PPR* » de 1997, qui préconise de croiser les données topographiques avec un niveau marin extrême de référence. Mais cette démarche commune se décline en réalité en une multitude de variantes, en raison notamment d'une grande hétérogénéité des données disponibles sur le littoral français. Ces approches ne sont en général pas directement applicables à l'ensemble du territoire.

Les méthodes développées à l'échelle nationale dans certains pays étrangers comme le Royaume-Uni, les Pays-Bas ou les États-Unis, sont par ailleurs difficilement transposables au littoral français compte tenu du manque de données existantes notamment sur les ouvrages de protection du littoral.

Le cas des Départements d'Outre-Mer est en outre différent de celui de la métropole, dans la mesure où les surcotes sont dues essentiellement à des événements cycloniques.

2 - À l'issue de cette première phase d'analyse bibliographique, nous avons choisi de proposer trois approches pour caractériser l'aléa submersion marine (deux pour la France Métropolitaine et une pour les Départements d'Outre-Mer). Elles reposent sur la méthode couramment adoptée de croisement d'un niveau de référence avec la topographie :

- une adaptation de l'approche simplifiée développée par le CETE-CETMEF pour la France métropolitaine ;

- une approche simplifiée pour les Départements d'Outre-Mer, applicable dans tous les cas malgré de fortes hétérogénéités sur les données disponibles concernant les niveaux d'eau extrêmes et la topographie ;
- une approche plus complexe permettant de tenir compte des variations morphologiques et géologiques des côtes tout en intégrant le *setup*.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL	11
1.2. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE	11
1.3. SUBMERSION MARINE : RAPPELS THÉORIQUES	12
1.3.1. La surcote atmosphérique	12
1.3.2. La surcote associée à la houle (setup)	12
1.3.3. La surcote totale	12
1.3.4. Le jet de rive (swash) et le run-up	14
2. Méthodes utilisées en France	15
2.1. RAPPEL DES RECOMMANDATIONS DU GUIDE PPR	15
2.2. MÉTHODE DU CROISEMENT DES NIVEAUX EXTRÊMES AVEC LA TOPOGRAPHIE	15
2.2.1. Les variantes de l'application du guide PPR	15
2.2.2. Détermination du niveau extrême	17
2.2.3. Les différentes données topographiques utilisées	28
2.2.4. Zonage et caractérisation de l'aléa	30
2.2.5. Remarques	34
2.3. LA MÉTHODE « ZONES BASSES » À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE	34
2.3.1. Niveaux extrêmes de référence	34
2.3.2. Topographie	36
2.3.3. Croisement du niveau de référence avec la topographie	36
2.3.4. Remarques	36
2.4. MÉTHODE HYDRO-GÉOMORPHOLOGIQUE	37
2.4.1. Présentation	37
2.4.2. Méthode	38
2.4.3. Remarques	40
2.5. MÉTHODE NUMÉRIQUE-ANALYTIQUE	41
2.5.1. Présentation	41
2.5.2. Méthode	41
2.5.3. Remarques	45

3. Méthodes utilisées à l'étranger	47
3.1. ÉTATS-UNIS	47
3.1.1. Contexte	47
3.1.2. Recommandation de la FEMA	47
3.1.3. Remarques	52
3.2. ROYAUME-UNI	52
3.2.1. Contexte	52
3.2.2. La méthode du projet RASP (DEFRA)	53
3.2.3. Remarques	56
3.3. PAYS-BAS	57
3.3.1. Contexte	57
3.3.2. Description de la méthode du projet FLORIS	57
3.3.3. Remarques	62
4. Propositions de méthodes applicables à l'échelle nationale	63
4.1. AVANT-PROPOS	63
4.2. FRANCE MÉTROPOLITAINE : MÉTHODE SIMPLE	65
4.2.1. Présentation de la méthode	65
4.2.2. Avantages	67
4.2.3. Inconvénients	67
4.3. DÉPARTEMENTS D'OUTRE MER : MÉTHODE SIMPLE	67
4.3.1. Présentation de la méthode	68
4.3.2. Avantages	69
4.3.3. Inconvénients	69
4.4. MÉTHODE DÉTAILLÉE	70
4.4.1. Présentation de la méthode	70
4.4.2. Avantages	72
4.4.3. Inconvénients	72
5. Conclusions et discussion	77
5.1. CONCLUSIONS	77
5.2. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES	82
6. Références bibliographiques	85

Liste des figures

Figure 1 - Exemple de surcote marine durant une tempête (Mars 2008, Corz, Ouessant).....	13
Figure 2 - Submersion marine dans une zone urbaine (Wimereux, Nord) avec surverse au-dessus d'ouvrage (02/1990 ; Photo Jean Célié).	13
Figure 3 - Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes.....	14
Figure 4 - Exemple de variante de la démarche de détermination de l'aléa submersion marine proposée par le Guide Méthodologique PPR.....	16
Figure 5 - Variantes de la méthode « croisement des données topographiques avec un niveau extrême de référence ».....	17
Figure 6 - Niveaux marins extrêmes pour une période de retour de 100 ans en Bretagne du Nord (Simon 2008, SHOM-CETMEF).	21
Figure 7 - Méthode pour le calcul des niveaux marins extrêmes (étude SHOM-CETMEF).....	22
Figure 8 - Maillage du modèle TOMAWAC pour les simulations d'états de mer (Benoit <i>et al.</i> , 2006).....	24
Figure 9 - Calcul de la surcote (en mètres) associée à une houle Nord-Est à Mayotte pour un cyclone de type Kamisy (avril 1984) lors d'une marée basse (modèle SWAN, rapport BRGM Lecacheux <i>et al.</i> , 2007).	26
Figure 10 - Zones d'iso-valeurs de niveaux marins de référence (vert).	35
Figure 11 - Coupe transversale d'une plaine alluviale.....	38
Figure 12 - Carte d'aléa de l'Est de l'Hérault selon l'Atlas des Zones Inondables Languedoc-Roussillon (méthode hydrogéomorphologique).	40
Figure 13 - Couples de valeurs « niveau extrême / hauteur de houle au large » à Grâves pour différentes périodes de retour de l'évènement global	42
Figure 14 - Modélisation de la propagation de la houle à l'aide de MIKE 21 SW.....	43
Figure 15 - Modélisation de la propagation de la houle le long d'un profil de plage.	43
Figure 16 - Modèle MIKE 21 HD appliqué à la Grande Plage de Gâvres (présentation P. Peeters au colloque « Nouvelles approches sur les risques côtiers », Paris, 30-31 janvier 2008).....	45
Figure 17 - Carte d'aléa submersion marine sur la commune de Gâvres (Peeters <i>et al.</i> , 2009).....	46
Figure 18 - Exemple de méthode proposée par la FEMA.	49
Figure 19 - Représentation schématique de la méthode développée dans le projet RASP.	54
Figure 20 - « Dike ring areas » et niveaux de sécurité associés, exprimés en probabilité d'occurrence par année.....	59
Figure 21 - Principales étapes de la méthode développée dans le projet FLORIS.....	60
Figure 22 - Représentation schématique de la méthode simplifiée proposée pour la métropole.....	66
Figure 23 - Représentation schématique de la méthode proposée pour les DOM.	69

Figure 24 - Représentation schématique de la méthode détaillée proposée pour la métropole.	73
Figure 25 - Calcul du setup pour chaque segment homogène du littoral.....	74
Figure 26 - Illustration de la surverse marine par dessus un ouvrage de protection lors de la tempête Johana de Mars 2008 (Saint-Malo).....	74
Figure 27 - Visualisation des zones basses entre un MNT IGN (haut) et un MNT modifié (en bas).	75
Figure 28 - Exemple schématique de stratégie pouvant être envisagée pour une meilleure évaluation de l'aléa submersion marine.....	83

Liste des tableaux

Tableau 1 - Comparaison des niveaux d'eau associés à différentes périodes de retour pour le marégraphe du Grau de la Dent pour une série temporelle sur 9 ans (SOGREAH, 1995) et 22 ans (Suanez <i>et al.</i> , 1997).	23
Tableau 2 - Exemples de critères de caractérisation de l'aléa submersion marine.....	33
Tableau 3 - Classification générale de l'aléa dans la zone littorale sableuse = (étude Languedoc-Roussillon).	39
Tableau 4 - Avantages et inconvénients des principales approches présentées dans ce rapport.	81

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL

En France, les problèmes de gestion du littoral se déclinent souvent à l'échelle de la région, du département voire de la commune selon les problématiques rencontrées localement. Cela se traduit notamment par une multiplicité des approches adoptées pour caractériser l'aléa submersion marine temporaire mais aussi par l'absence d'une stratégie nationale.

La mise en œuvre de l'évaluation préliminaire du risque d'inondation par submersion marine temporaire dans le cadre de la Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil requiert pourtant une vision nationale des territoires potentiellement inondés, afin d'appréhender de manière homogène l'extension des aléas, leur probabilité d'occurrence et leurs conséquences.

Dans cette perspective, le MEEDDM (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer) a confié au BRGM une étude ayant pour objet :

- de faire une analyse synthétique des méthodes utilisées en France pour évaluer les emprises et la qualification de l'aléa submersion marine actuelle ;
- de proposer une ou plusieurs méthodes applicables à l'échelle nationale, en s'appuyant sur les résultats de l'analyse précédente.

Ce rapport présente l'ensemble des résultats de cette étude.

1.2. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Ce travail est composé de trois grands volets :

- une analyse critique comparative des principales méthodes utilisées en France aux échelles régionales, départementales, voir communales pour évaluer l'aléa submersion marine (chapitre 2). Elle repose dans une large mesure sur les documents mis à disposition par la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques). Le BRGM a par ailleurs pris contact avec plusieurs services décentralisés (DREAL Nord-Pas-de-Calais, DDEA Morbihan, DDE Guyane, DDE de la Réunion, DRE du Languedoc-Roussillon), ainsi que le CETMEF ou Météo-France pour compléter ces informations ;
- une description succincte des approches élaborées dans trois pays étrangers (chapitre 3) connus pour leurs travaux avancés en termes d'évaluation de l'aléa submersion marine à grande échelle : le Royaume-Uni, les Pays-Bas et les États-Unis. Cette description s'appuie sur les documents publiés (articles, rapports, etc.) ;
- des propositions de méthodes permettant d'évaluer l'aléa submersion marine à l'échelle nationale (chapitre 4).

1.3. SUBMERSION MARINE : RAPPELS THÉORIQUES

Les submersions marines peuvent être définies comme « *des inondations épisodiques de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques sévères [...]* » (Garry *et al.*, 1997). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer (Figure 1 et Figure 2) lors de tempêtes ou de cyclones¹.

Les surcotes marines sont contrôlées par deux principaux facteurs : la surcote atmosphérique et la surcote associée à la houle.

1.3.1. La surcote atmosphérique

Le passage d'un important système dépressionnaire (cyclone, ouragan, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :

- la chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de *baromètre inverse*. Une diminution d'1 hPa équivaut par exemple à une élévation d'1 cm du plan d'eau ;
- le vent génère des courants dans la masse d'eau poussant l'eau vers certaines zones. Si la bathymétrie est faible, les contre-courants ne peuvent s'installer induisant une accumulation d'eau responsable d'une surcote.

1.3.2. La surcote associée à la houle (*setup*)

A l'approche de la côte, les vagues déferlent : elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau, provoquant une élévation moyenne du plan d'eau (*setup*). Cette force induite par la houle est appelée « tension de radiation ». Son intensité varie en fonction des hauteurs et des directions de vagues, elles mêmes dépendantes des phénomènes de gonflement (*shoaling*), de réfraction, de diffraction et de dissipation qui ont lieu au niveau des côtes.

1.3.3. La surcote totale

La part relative de la surcote atmosphérique et de la surcote associée à la houle dans la surcote totale est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré. En présence d'un plateau continental large, c'est-à-dire une zone de pente douce et de profondeur limitée, l'action du forçage atmosphérique est généralement prépondérante. Par contre, lorsque les pentes sont fortes et que les côtes sont protégées par des récifs par exemple, c'est la surcote associée à la houle qui prédomine.

¹ Les submersions marines peuvent être provoquées par d'autres événements, comme des tsunamis déclenchés par des séismes ou des mouvements de terrain. Les submersions marines générées par de tels phénomènes ne sont pas traitées dans cette étude.

Le niveau de la mer est déterminé en sommant ces contributions avec celle de la marée astronomique, c'est-à-dire la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil.

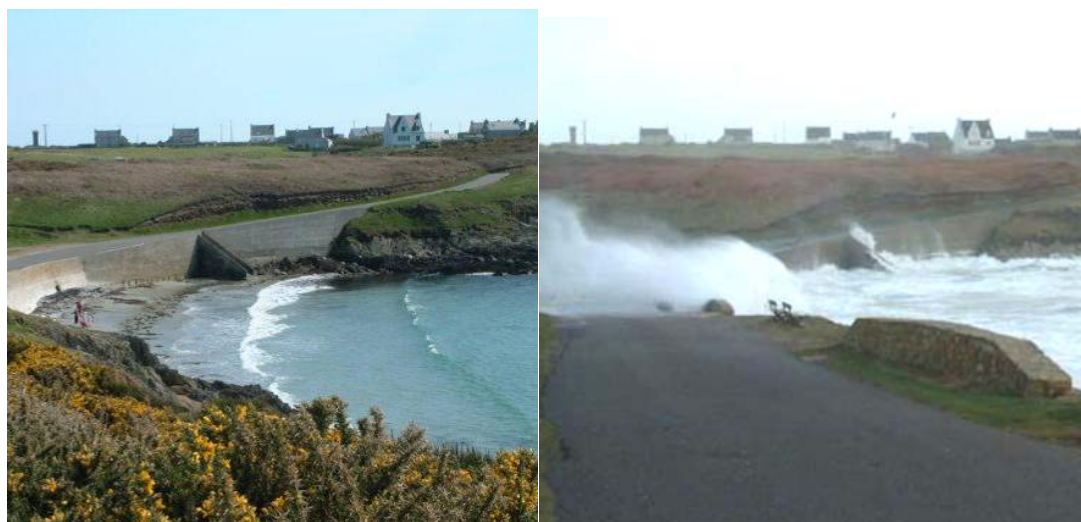


Figure 1 - Exemple de surcote marine durant une tempête (Mars 2008, Corz, Ouessant).



Figure 2 - Submersion marine dans une zone urbaine (Wimereux, Nord) avec surverse au-dessus d'ouvrage (02/1990 ; Photo Jean Celié).

1.3.4. Le jet de rive (*swash*) et le *run-up*

Pour obtenir le niveau instantané de la mer sur le rivage, il faut tenir compte par ailleurs du **jet de rive** (*swash*), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur la plage ou tout autre plan incliné (talus de digue par exemple). On appelle ***run-up*** la hauteur d'eau maximale atteinte par la mer au dessus de son niveau moyen. La Figure 2 et la Figure 3 illustrent l'ensemble de ces mécanismes.

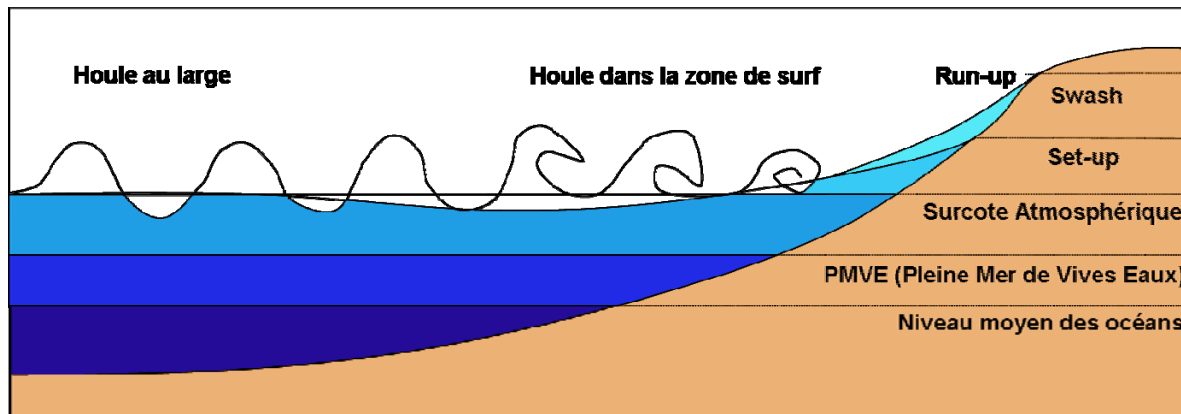


Figure 3 - Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes.

2. Méthodes utilisées en France

2.1. RAPPEL DES RECOMMANDATIONS DU GUIDE PPR

Le « *Guide Méthodologique PPR* » de 1997 préconise de croiser les données topographiques de l'IGN avec un niveau marin extrême de référence. Ce niveau marin extrême de référence est défini comme étant soit le niveau d'occurrence centennale (donné par le SHOM pour la façade Manche-Atlantique) soit le niveau extrême historique si celui-ci est supérieur au niveau centennal.

2.2. MÉTHODE DU CROISEMENT DES NIVEAUX EXTRÊMES AVEC LA TOPOGRAPHIE

2.2.1. Les variantes de l'application du guide PPR

En France, la plupart des travaux de caractérisation de l'aléa submersion marine sont des études locales (à l'échelle d'une commune par exemple) qui s'inspirent des recommandations du « *Guide Méthodologique PPR* ».

Les approches y varient toutefois considérablement, en raison des problématiques rencontrées localement mais aussi de la diversité des données disponibles. Elles se différencient tout d'abord par la *démarche adoptée pour évaluer le niveau de référence*. Faut-il déterminer le niveau de la marée et la surcote atmosphérique de manière indépendante ou séparée ? Faut-il ou non considérer le *setup* ? Le *run-up* ? Les études se distinguent ensuite par les *modalités d'évaluation des valeurs de ces paramètres*. Le *setup* peut être calculé par exemple à l'aide d'un modèle numérique ou à partir de formules empiriques. On observe enfin des divergences portant sur les *données topographiques utilisées* et la *manière dont sont croisées ces informations* pour évaluer et cartographier l'aléa submersion marine.

La Figure 4 donne un exemple de démarche adoptée, consistant à calculer chaque contribution au niveau de référence de manière indépendante : la marée, la surcote atmosphérique, le *setup* et le *run-up* (déterminés par exemple à partir des caractéristiques de houle à la côte, de la pente de la plage sous-marine et de lois empiriques).

Parmi les autres démarches envisageables, on peut par exemple ne tenir compte que de la marée et de la surcote atmosphérique, ou encore estimer le niveau marin extrême par jugement d'expert à partir de données historiques ou en s'appuyant sur l'étude SHOM/CETMEF (voir Figure 5).

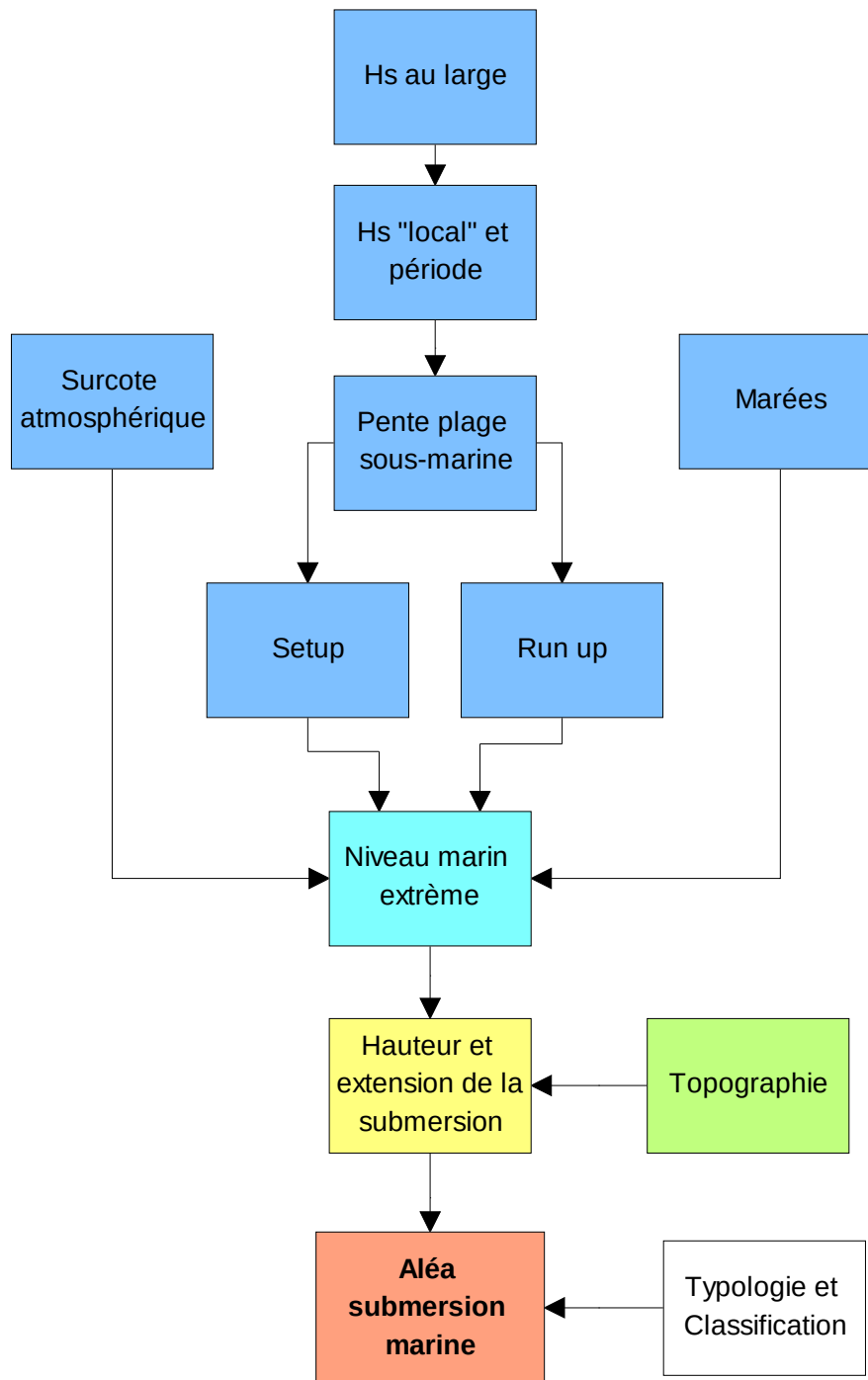


Figure 4 - Exemple de variante de la démarche de détermination de l'aléa submersion marine proposée par le Guide Méthodologique PPR.

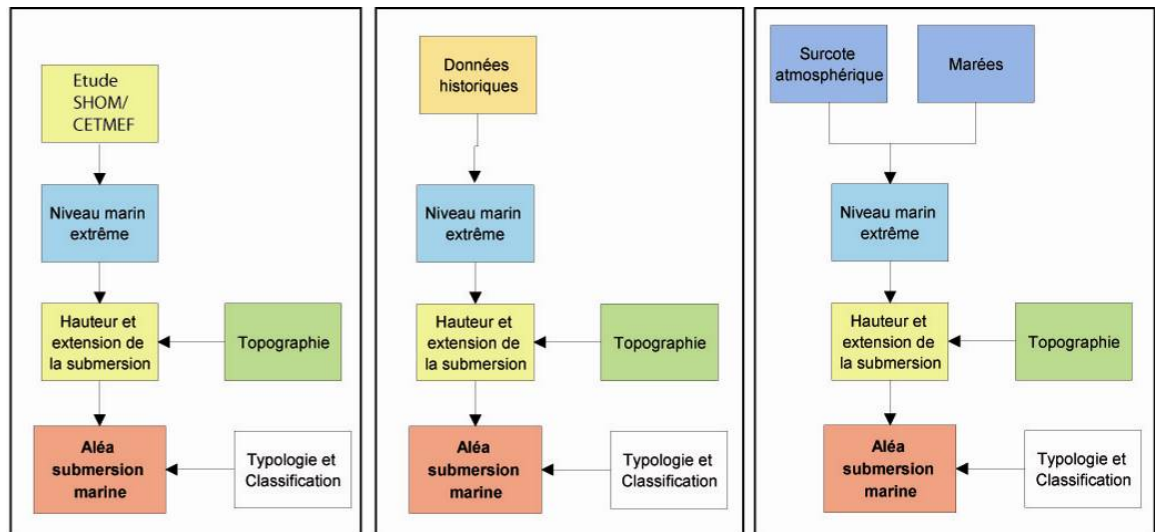


Figure 5 : Variantes de la méthode « croisement des données topographiques avec un niveau extrême de référence ».

Dans la suite de ce chapitre, nous réaliserons un inventaire des principales solutions recensées pour chacune des étapes mentionnées précédemment pour caractériser l'aléa, à savoir :

- la détermination des paramètres servant au calcul du niveau extrême : marée, surcote atmosphérique, *setup*, *run-up*, etc. ;
- les données topographiques utilisées ;
- la manière dont sont croisées toutes ces informations pour cartographier et évaluer l'aléa submersion marine.

Remarquons encore une fois que la grande majorité de ces démarches n'ont été appliquées qu'à des échelles locales (une ou plusieurs communes le plus souvent). Nous n'avons recensé qu'une seule étude à l'échelle nationale, celle du CETE-CETMEF proposée en 2009, et que nous décrirons plus en détail à la fin de ce chapitre.

2.2.2. Détermination du niveau extrême

a) Niveaux historiques

Une première approche pour déterminer un niveau extrême de référence consiste à s'appuyer sur les données historiques. Il peut s'agir de témoignages, d'archives de presse, d'arrêtés de catastrophes naturelles, d'analyses photographiques, ou encore de marégrammes.

Le « *Guide d'élaboration des PPR submersion marine en Languedoc-Roussillon* » a relevé par exemple les niveaux historiques atteints dans les zones portuaires en Languedoc-Roussillon pour la période 1982-1999. La plus forte valeur observée a été extrapolée pour approcher l'occurrence centennale, ce qui donne finalement une cote

du niveau d'eau de +2 m NGF. Le guide préconise donc de prendre un niveau de +2 m NGF (voire +3 m NGF dans les zones exposées aux vagues) pour caractériser l'aléa de référence de l'ensemble du littoral du Languedoc-Roussillon ou la cote maximale déjà observée si celle-ci est supérieure.

Autre exemple, celui de l'étude PPRL de l'île de Cayenne (BRGM, 2000), pour laquelle un niveau de +2 m NGF a été retenu, correspondant au plus haut niveau enregistré majoré d'une dizaine de centimètres pour tenir compte des effets de surcote associés à un vent soutenu.

Le principal inconvénient de ce type d'approche tient au manque d'informations dont on dispose. Les données historiques ne concernent au mieux que quelques événements au cours des dernières décennies, et ne peuvent donc pas être exploitées dans le cadre d'une étude statistique, notamment pour le calcul d'un niveau extrême centennal comme le préconise le Guide PPR. C'est le constat tiré notamment par le CETE Méditerranée lors d'une étude sur les communes des Saintes-Maries-de-la-Mer, Arles et Port-Saint-Louis-du-Rhône (« *Élaboration d'un PPR-SM en Camargue. État des lieux des données existantes, 2007* »), pour laquelle le niveau d'eau le plus élevé observé a finalement été retenu comme référence. La distribution spatiale de ces données ne couvre d'ailleurs pas toujours l'ensemble de la zone d'étude. Certains effets de site peuvent donc ne pas être mis en évidence. Ce type d'approche repose en outre sur l'hypothèse que le littoral n'évolue pas. Celle-ci n'est pas toujours valable, en cas de forte urbanisation par exemple, ou encore en raison d'une modification de la morphologie de la plage et du cordon dunaire.

Ces études sont toutefois très intéressantes dans la mesure où elles peuvent permettre de confronter et de valider des modèles plus complexes avec des données réelles. C'est le cas notamment du modèle présenté dans le chapitre 2.5 de ce rapport. L'assemblage de données historiques peut donc être considéré comme un pré requis nécessaire à toute étude de caractérisation de l'aléa submersion marine.

Évaluation de la marée et de la surcote atmosphérique

Le niveau extrême de référence peut être aussi évalué en estimant la valeur de chacune de ses « composantes » : un niveau de référence pour la marée, la surcote atmosphérique, le *setup*, ou encore le *run-up*. Nous présenterons dans un premier temps les principales approches utilisées pour déterminer une valeur de marée et de surcote atmosphérique. Nous verrons que celles-ci peuvent être évaluées séparément, ou conjointement. La surcote associée aux vagues et le jet de rive seront traités ultérieurement.

- **Marée**

La marée astronomique est un phénomène prédictible et modélisable. L'amplitude des variations du niveau de la mer dues à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil est en général bien connue et peut être obtenue dans les annuaires de marée établis par le SHOM.

La valeur attribuée à la marée lors de l'évaluation du niveau marin de référence correspond en général au niveau maximum des plus fortes marées astronomiques. C'est le cas par exemple des études PPR sur la région de Côte-sous-le-Vent en Guadeloupe et les communes de Terre-de-Bas et Terre-de-Haut aux Saintes.

- **Surcote atmosphérique**

La surcote atmosphérique, générée par l'action du vent et par la pression atmosphérique, est calculée de manière indépendante dans plusieurs études. C'est le cas notamment de nombreux PPR réalisés aux Antilles (ex : PPR Saint François, Guadeloupe ; PPR Anse-Bertrand, Port-Louis, Petit-Canal, Guadeloupe ; PPR Terre-de-Bas et Terre-de-Haut, Saintes, PPR Côte-sous-le-vent de Guadeloupe, communes de Deshaies, Pointe-Noire, Bouillante, Vieux Habitants, Baillif et Vieux-fort). Dans ces travaux, la surcote associée aux cyclones a été estimée par Météo France à l'aide d'un modèle numérique résolvant les équations de Saint-Venant, forcé par le vent et la pression atmosphérique. Les champs de vent et de pression sont constitués à partir des « Advisories » (messages émis toutes les 3 ou 6 h par le NHC -*National Hurricane Center*-, donnant les caractéristiques d'un cyclone en cas de tempête tropicale) et la base de données HURDAT sur toute la période 1900-2000. Seuls sont conservés les cyclones susceptibles d'avoir engendré une surcote « importante ». Ceux-ci ne sont toutefois pas suffisamment nombreux pour pouvoir calculer des périodes de retour centennales. La méthode appliquée consiste donc à créer artificiellement 10 nouveaux siècles de données à partir de celles de 1900-2000. Pour la n^{ième} année d'un nouveau siècle, on tire de manière aléatoire et avec remise autant de cyclones que dans la n^{ième} année du XX^e siècle parmi les cyclones sélectionnés précédemment. Il n'y a donc pas de modification de la répartition temporelle des cyclones. En revanche, leur trajectoire est légèrement modifiée de manière aléatoire par rapport aux cyclones observés pour tenir compte de la variabilité spatiale d'occurrence de ce type d'évènement. Une fois créée cette base de données de cyclones synthétiques, l'approche consiste à calculer les valeurs de surcote pour chacun de ces événements, et à en déduire les valeurs de surcotes atmosphériques centennales à partir d'un traitement statistique. Cette méthode paraît tout à fait pertinente pour le calcul d'une surcote centennale en pleine mer. Elle repose sur une bonne connaissance des cyclones historiques et sur leur représentativité en termes d'intensité et de trajectoires. En revanche, sa mise en œuvre nécessiterait un certain nombre d'adaptations pour être appliquée à la problématique de submersion. En effet, les conditions aux limites à la côte (imposées dans le modèle) sont celles d'un mur infiniment haut, ce qui n'est pas valable en cas de surcote importante et d'inondation. Par ailleurs, la taille de maille (> 400 m) ne permet pas de représenter correctement les baies et les anses de petites tailles.

Le modèle de Météo France a été transposé à la France métropolitaine pour des prédictions de surcotes atmosphériques à 48 h. L'emprise comprend le Golfe de Gascogne, la Manche et la Mer du Nord, avec un pas de maillage d'environ 9 km. La comparaison des prédictions de Météo France avec les données marégraphiques aux Sables d'Olonne entre octobre 2006 et mars 2007 semble indiquer que le modèle sous-estime la surcote de manière assez systématique (Lebreton et Perherin, 2009). L'écart moyen est d'environ 14 cm sur l'ensemble des prévisions, avec des pics à

plusieurs dizaines de centimètres. Ce modèle de prédiction n'est donc pas tout à fait satisfaisant.

Une approche « grande emprise » a été mise en place dans le cadre du projet européen EUROSION pour évaluer l'exposition des côtes européennes (françaises, notamment) à la surcote générée par l'action du vent. Le principe est le suivant :

- pour chaque point de la côte, on détermine les valeurs de *fetch* (c'est-à-dire la plus longue distance en ligne droite que peuvent parcourir les houles arrivant en un point) dans 8 directions (tous les 45°) ;
- pour chacun de ces points, on attribue huit valeurs bathymétriques h (correspondant à la bathymétrie à une distance $X = \text{fetch}$ de la côte dans chacune des huit directions) ;
- pour chaque point et chaque direction, on calcule la surcote atmosphérique à partir de la formule suivante (dérivée de la formule de « *wind stress* » de Wu, 1980) :

$$\eta = \frac{C_D \rho_A W_{10}^2}{\rho g} \int_{x=\text{fetch}}^{x=5\text{km}} \frac{dx}{h(x)} = \frac{C_D \rho_A W_{10}^2}{\rho g} \times \frac{-\text{fetch} \times [\ln(5) - \ln(x = \text{fetch})]}{h(\text{fetch})}$$

où :

- η est la surcote associée aux contraintes exercées par le vent,
- x : distance à la côte dans la direction d'étude,
- $C_D = (0.8 + 0.065 W_{10}) \times 10^{-3}$: coefficient de friction,
- W_{10} : vitesse du vent 10 m au-dessus de la surface de la mer,
- $\rho_A = 1.293 \text{ kg.m}^{-3}$: densité de l'air,
- $\rho = 1025 \text{ kg.m}^{-3}$: densité de l'eau de mer,
- $g = 9.8 \text{ m.s}^{-2}$: accélération de la pesanteur,
- $h(x)$: profondeur à la distance x de la côte.

La valeur adoptée pour la vitesse du vent est celle qui est excédée pendant 1 % du temps.

- pour chaque point, on choisit comme valeur de surcote atmosphérique celle qui est la plus élevée parmi les huit obtenues (les huit directions)

Cette formulation n'est pas tout à fait satisfaisante dans la mesure où elle ne tient pas compte des effets de site, et où elle repose sur des hypothèses fortes comme le fait que le vent souffle avec la même intensité dans la même direction sur toute la longueur du fetch. On sait par ailleurs que le coefficient de friction n'est pas uniquement fonction de la vitesse du vent. Mais cette formulation permet néanmoins d'obtenir un bon ordre de grandeur de l'élévation du niveau d'eau du fait des contraintes exercées par le vent. Par contre, elle ne tient pas compte de l'élévation du niveau de la mer en raison des variations de pression atmosphérique.

• Les niveaux extrêmes du SHOM/CETMEF

Beaucoup d'études de submersion marine sur la façade Atlantique ou la Manche utilisent les valeurs centennales de niveaux extrêmes de pleines mer calculées par le SHOM (ex : Figure 6). C'est le cas notamment de plusieurs PPR dans le département du Finistère (ex : PPR Guisseny à Plouescat).

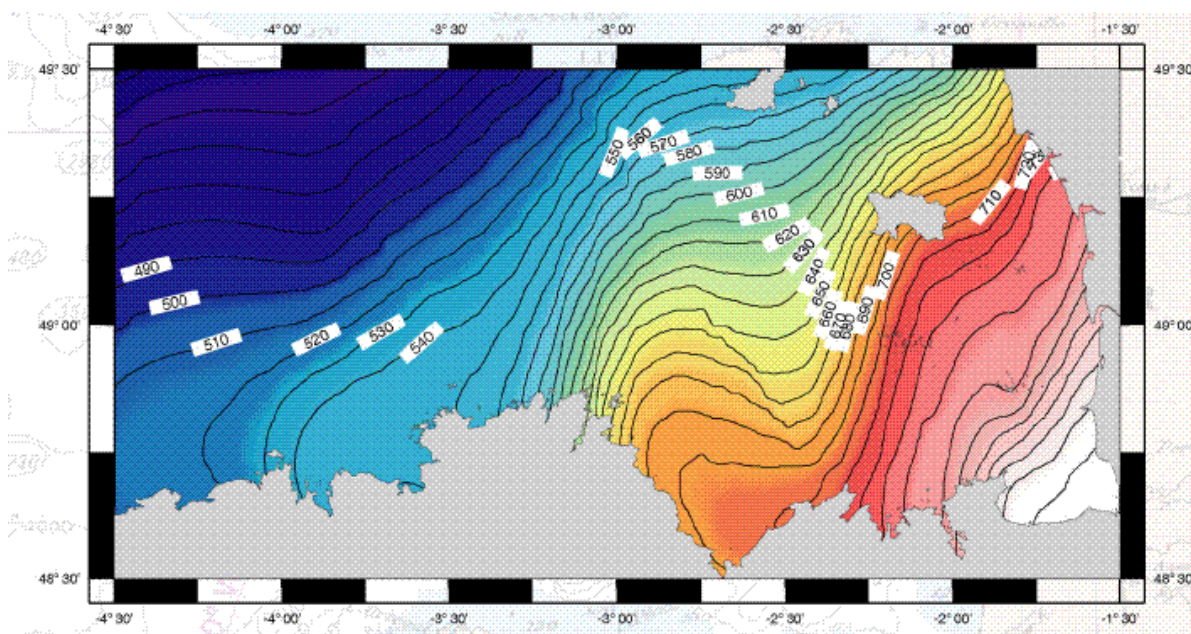


Figure 6 - Niveaux marins extrêmes pour une période de retour de 100 ans en Bretagne du Nord (Simon, 2008 ; SHOM-CETMEF).

Ces valeurs sont déterminées de la façon suivante (voir figure 7) :

- la surcote (c'est-à-dire l'écart entre les hauteurs de pleines mers observées et prédites) est mesurée dans 16 ports dits « de référence », pour lesquels plus de 10 années d'observations de marée sont disponibles ;
- les probabilités pour une surcote d'excéder une valeur donnée sont évaluées pour chaque port de référence à l'aide de la loi de Gumbel ;
- ces probabilités sont combinées avec la fonction de densité de probabilité des hauteurs de pleines mers prédites pour obtenir la probabilité d'observer des hauteurs de pleines mers supérieures à une valeur donnée dans chaque port de référence ;
- les périodes de retour des marées extrêmes sont ensuite calculées sur des « points secondaires », grâce aux mesures issues de capteurs de pression disposés par le SHOM lors de travaux de sondages hydrographiques (les lois de probabilité sont déduites des relations existant entre les hauteurs mesurées et celles observées simultanément au port de référence le plus proche) ;

- les niveaux marins extrêmes de pleine mer correspondant à une période de retour donnée sont cartographiés par interpolation des valeurs obtenues aux points de référence et aux points secondaires.

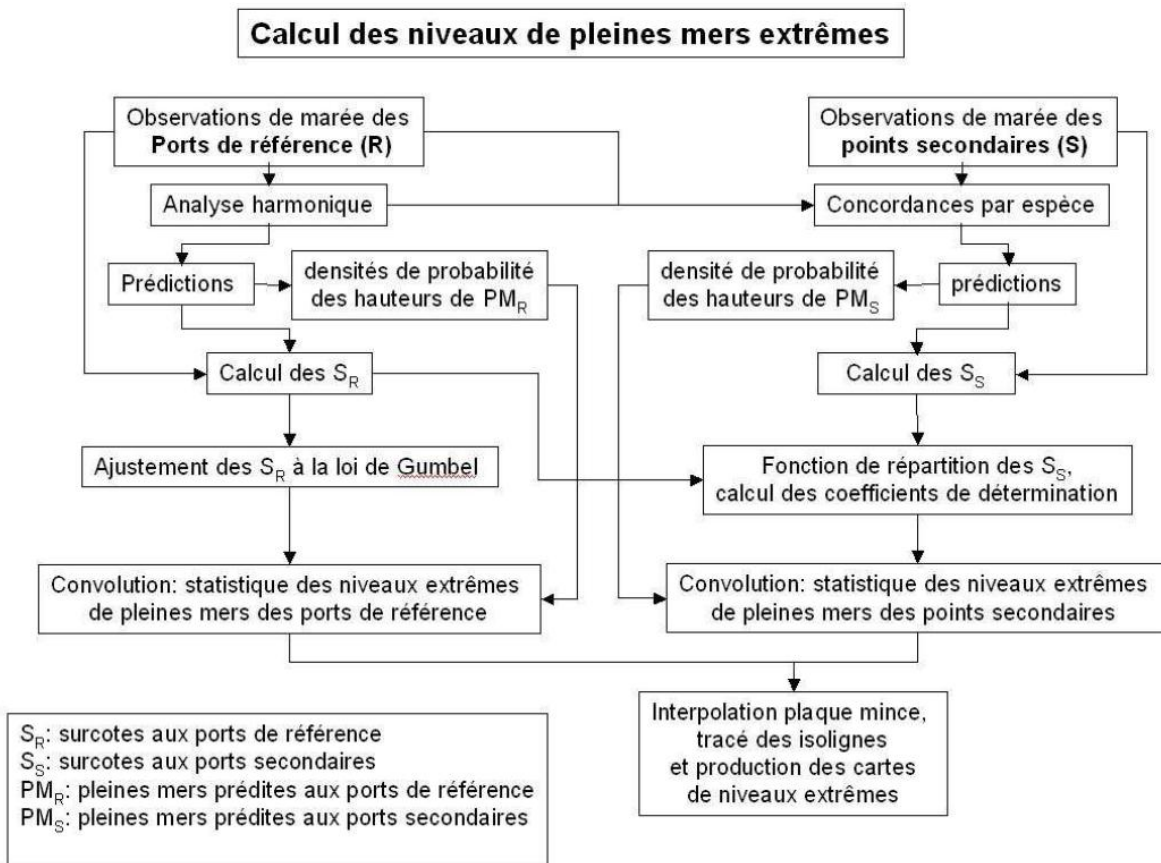


Figure 7 - Méthode pour le calcul des niveaux marins extrêmes (étude SHOM-CETMEF).

Les niveaux marins calculés de cette manière tiennent compte de la marée et des surcotes atmosphériques, mais pas des états de mer, des processus dynamiques dans la région de déferlement (*setup*), ou encore des seiches. Des études complémentaires sont donc nécessaires pour tenir compte de ces effets.

Remarquons par ailleurs que les résultats de cette étude reposent sur des séries temporelles « utilisables » excédant rarement la trentaine d'année pour les ports de référence. Or il est admis en général que ce type d'analyse statistique n'est plus très fiable pour des périodes de retour trois fois supérieures à la longueur de la série statistique d'origine. D'un point de vue méthodologique, on se situe donc en « limite d'utilisation » pour la prédiction des niveaux extrêmes centennaux.

- **En Méditerranée**

La méthode élaborée par le SHOM pour déterminer les niveaux marins d'occurrence centennale n'a été développée que pour la Manche et la façade Atlantique. En Méditerranée, d'autres procédures sont utilisées pour évaluer les niveaux d'eau extrêmes associés à la fois à la marée et à la surcote atmosphérique.

Le bureau d'étude SOGREAH a, par exemple, déterminé le niveau d'eau en Camargue pour plusieurs périodes de retour à partir d'une loi statistique de Gumbel et des enregistrements du marégraphe du Grau de la Dent entre 1985 et 1993 (SOGREAH, 1995). Suanez *et al.* (1997) ont repris cette analyse statistique mais pour une série temporelle environ deux fois plus longue (de 1974 à 1995). Il est intéressant de comparer les résultats, récapitulés dans le Tableau 1.

Périodes de retour	de Niveau d'eau NGF SOGREAH (1995)	Niveau d'eau NGF Suanez et al. (1997)	Ecart relatif
2 ans	+ 0,82 m	+ 0,83 m	1 % (1 cm)
5 ans	+ 0,94 m	+ 0,97 m	3 % (3 cm)
10 ans	+ 1,02 m	+ 1,06 m	4 % (4 cm)
20 ans	+ 1,06 m	+ 1,12 m	6 % (6 cm)
50 ans	+ 1,18 m	+ 1,28 m	8 % (10 cm)
100 ans	+ 1,20 m	/	/

Tableau 1 - Comparaison des niveaux d'eau associés à différentes périodes de retour pour le marégraphe du Grau de la Dent pour une série temporelle sur 9 ans (SOGREAH, 1995) et 22 ans (Suanez et al., 1997).

Ces résultats confirment la remarque faite précédemment pour l'étude CETMEF/SHOM, à savoir que les niveaux extrêmes calculés de manière statistique sont très dépendants de la longueur de la série temporelle. Les erreurs peuvent dépasser la dizaine de centimètres pour les grandes périodes de retour. Suanez *et al.* (1997) estiment d'ailleurs que leurs résultats ne sont pas significatifs pour une période de retour de 100 ans. Le niveau extrême centennal paraît en tout cas très sous-estimé dans le rapport SOGREAH (1,20 m) si l'on observe les niveaux maximums atteints au marégraphe du Grau de la Dent au cours des années 1996 et 1997 : 1,22 m en octobre 1996, 1,58 m en novembre 1997, et 1,48 m en décembre de la même année.

Pirazzoli et Tomasin (2008) ont estimé les périodes de retour des niveaux extrêmes en Méditerranée centrale à partir de 27 marégraphes situés pour la plupart le long des côtes françaises et italiennes. Ils ont appliqué la méthode des probabilités jointes, qui consiste à analyser les hauteurs observées heure par heure en séparant la contribution de la marée et celle de la surcote (d'origine atmosphérique essentiellement). Cette méthode permet de faire des calculs de probabilité dans le cas de séries temporelles courtes présentant des lacunes, comme c'est le cas en Méditerranée, mais présente aussi des inconvénients. Elle a tendance en effet à surestimer les hauteurs de vagues correspondant à une période de retour donnée. Les surcotes-décotes observées sont en outre très corrélées d'une heure sur l'autre, ce qui complique leur traitement

statistique. Les résultats obtenus dépendent beaucoup par ailleurs de la longueur de la série temporelle, à l'instar des autres méthodes présentées précédemment.

Évaluation de la surcote associée à la houle = (setup)

- **Évaluation à partir des caractéristiques des houles à la côte**

En l'absence de données, il est nécessaire d'évaluer le *setup* par des méthodes indirectes. Une première étape consiste à déterminer les caractéristiques de houle au large, là où on dispose d'informations, puis de les propager jusqu'à la côte.

Dans les Antilles, les Plans de Prévention des Risques (ex : PPR Saint François, PPR Terre-de-Bas et Terre-de-haut, PPR côte sous le vent de Guadeloupe, etc.) s'appuient souvent sur les résultats d'études Météo France pour les houles cycloniques. Nous n'avons pas eu beaucoup de détails malheureusement sur la manière dont ils sont obtenus. S'il s'agit de données de houlographes et de modèles globaux, les résultats sont probablement sous-estimés dans la mesure où les houlographes restent peu nombreux, et compte tenu de la faible résolution des grilles de calcul des modèles globaux.

Dans l'étude de Cariolet et Suanez (2009) sur les plages du Vougot et de Boutrouilles dans le Finistère, les données de houle sont obtenues cette fois à partir d'analyses statistiques sur les états de mer côtiers simulés sur la période 1979-2002 à l'aide du logiciel TOMAWAC (Benoit et al., 1996), développé par EDF-LNHE avec le soutien du CETMEF. La génération et la propagation des vagues sont modélisées sur un maillage de résolution spatiale variable (de quelques kilomètres à 100 km environ, voir Figure 8), avec un forçage par le vent issu de la ré-analyse ERA-40 du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (ECMWF).

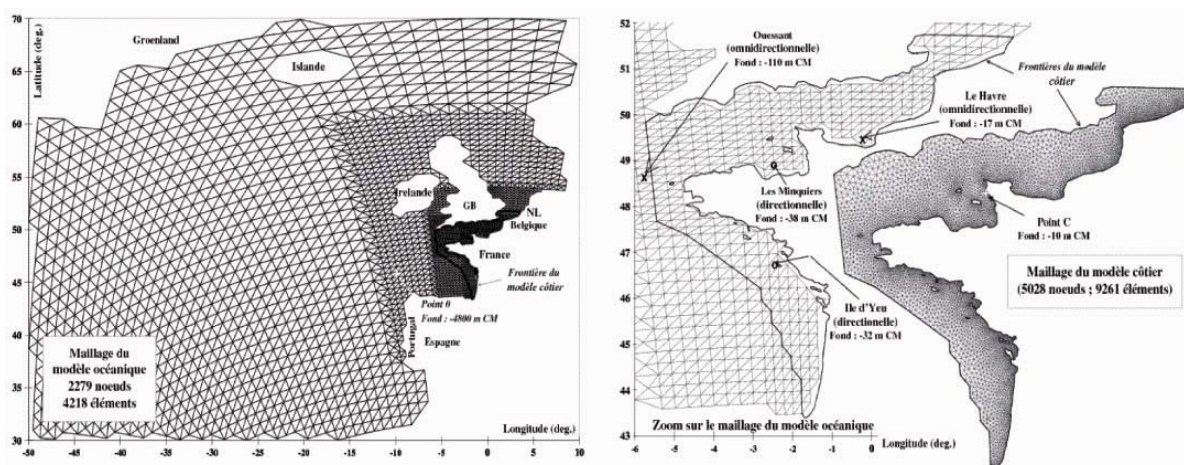


Figure 8 - Maillage du modèle TOMAWAC pour les simulations d'états de mer (Benoit et al., 2006). À gauche : maillage « océanique », à droite : maillage « côtier ».

Les hauteurs significatives de vagues sont calculées pour une période de retour de 100 ans par la méthode dite « Peaks Over Threshold » (POT), qui consiste à

sélectionner un échantillon de pics de hauteur significative indépendants en utilisant une méthode à seuil. On suppose que les valeurs des pics sont réparties selon une distribution généralisée de Pareto (GPD), et que le processus d'occurrence des pics suit une loi de Poisson. Cette méthode permet en général d'obtenir de bons ordres de grandeur des caractéristiques de houle avant déferlement.

D'autres codes de propagation de la houle peuvent être envisagés. Le modèle global WaveWatch 3 piloté par la NOAA peut être par exemple utilisé pour déterminer des séries temporelles au large des côtes françaises. On peut ensuite appliquer les résultats à des codes tels que SWAN ou MIKE 21 SW (voir 2.5.) pour propager la houle jusqu'à la côte.

• Évaluation à l'aide de formules empiriques

Connaissant les caractéristiques de houle à la côte, il est possible d'estimer le *setup* à partir de formules empiriques simples, obtenues par des expériences de laboratoire ou des observations sur le terrain. Celles-ci ne s'appliquent en général qu'à une gamme très restreinte de plages et de caractéristiques de houle. Nous mentionnons ici quelques exemples d'études y faisant référence :

- la méthode appliquée dans le PPR de la commune de Capesterre-Belle-Eau consiste à écrire que la surcote associée aux vagues est égale à 8 % de la hauteur de houle caractéristique devant le site, ce qui représente dans cette étude environ 80cm pour les zones exposées à la houle et 20 cm pour les zones abritées derrière des hauts-fonds ou des cayes. Cette formule n'est pas réellement satisfaisante dans la mesure où elle ne tient pas compte de deux paramètres importants : la pente de la plage et la période de la houle ;
- la valeur du *setup* est parfois estimée en s'appuyant sur les formules du Shore Protection Manual (1984) édité par le US Army Corps of Engineers (ex : *PPR Côtes sous le vent*). Mais elles ne tiennent pas compte non plus de la pente de la plage ;
- *Anselme et al (2008)*, ou encore *Cariolet et Suanez (2009)*, utilisent la formule de Holman et Sallenger (1985) :

$$\eta = 0.45 H_0 \xi_0$$

où 0.45 est une constante sans dimension, H_0 la hauteur significative de la houle au large (en m) et ξ_0 le nombre d'Iribarren introduit par Battjes en 1974, qui caractérise le déferlement, et se calcule par la formule suivante :

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

où $\tan \beta$ est la pente de l'avant plage et L_0 la longueur d'onde de la houle au large. Cette formule n'est toutefois valable que dans le cas de plages régulières, avec une pente assez faible.

- **Évaluation à l'aide de modèles numériques**

Quelques études de submersion marine font appel à des modèles numériques comme MIKE 21 SW (développé par DHI) ou SWAN (Simulating Waves Nearshore, Booij et al. 2004) pour calculer le *setup* en résolvant les équations de tension de radiation.

La Figure 9 montre un exemple de résultat donné par SWAN dans le cas d'un cyclone de type Kamisy (avril 1984) passant à proximité de Mayotte, calculé à partir des données de vent de Météo France (étude BRGM, Lecacheux *et al.*, 2007).

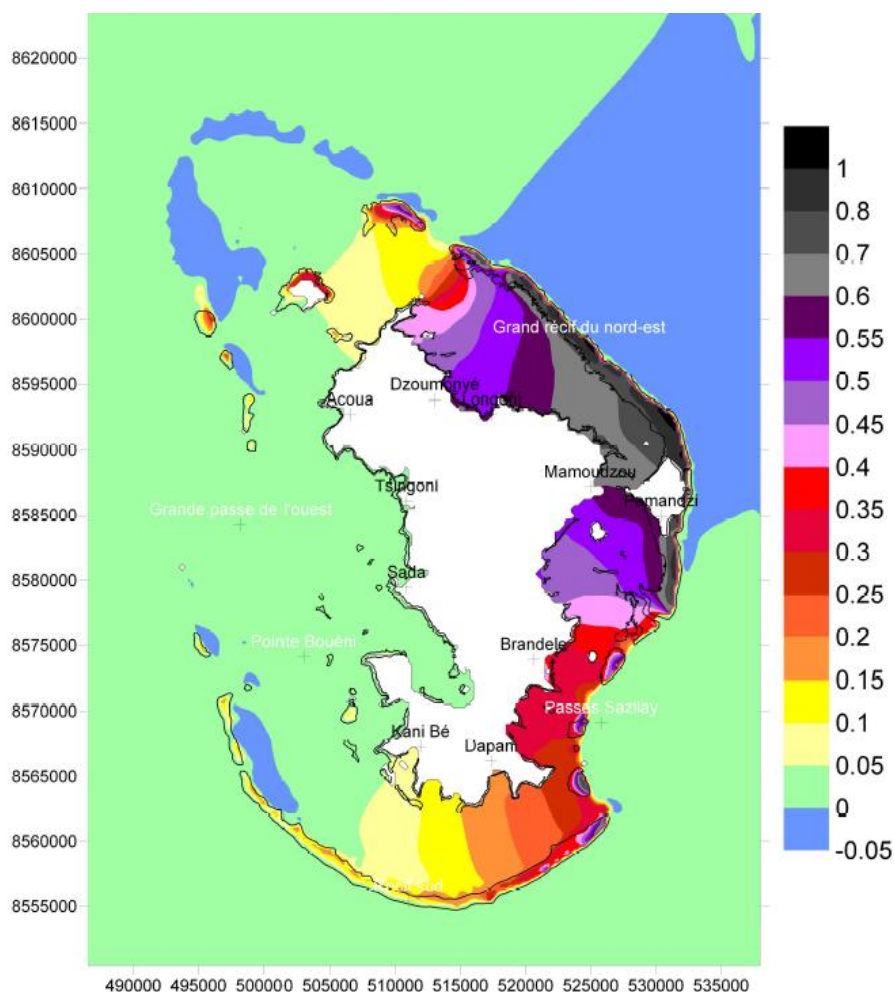


Figure 9 - Calcul de la surcote (en mètres) associée à une houle Nord-Est à Mayotte pour un cyclone de type Kamisy (avril 1984) lors d'une marée basse (modèle SWAN, rapport BRGM Lecacheux et al., 2007). Les traits en gras indiquent la position des récifs.

Ces modèles donnent des résultats plus satisfaisants que les formules empiriques évoquées précédemment. Ils permettent notamment de traiter le cas de morphologies plus compliquées, par exemple en présence d'une barre sous-marine. Elles nécessitent en revanche une bonne résolution des données bathymétriques.

• Remarques

Le *setup* peut contribuer à la surcote totale de manière tout à fait significative. Il est estimé par exemple à plus d'un mètre pour un événement d'occurrence centennale dans le PPR Côtes sous le vent (Antilles). On recense pourtant de nombreuses études qui n'en tiennent pas compte (ex : PPR Plouguerneau ; PPR Anse-Bertrand, Port-Louis, Petit-Canal ; Élaboration PPR Camargue ; Étude préalable à la mise en place PPR Morbihan ; CETE côtes Basses meubles ; Programme INTERREG IIIa CETMEF 2003-2005 ; Suret, 2006 ; EuroSION ; etc.). Ceci tient en grande partie aux difficultés rencontrées pour le quantifier. Les analyses de niveaux d'eau extrêmes reposent en effet souvent sur des données marégraphiques portuaires obtenues dans des eaux relativement profondes où le déferlement n'est pas fréquent et où la surcote liée à la houle n'est que très partielle.

Évaluation du jet de rive (*run-up*)

Le jet de rive (cf. § 1.3.) est à l'instar du *setup* rarement pris en compte dans les études de caractérisation de l'aléa submersion marine. On ne dispose bien souvent que d'informations trop imprécises en termes de topographie ou de nature du terrain pour pouvoir déterminer l'extension de la zone inondée par la propagation des vagues de manière satisfaisante. Le *run-up* (i.e. l'élévation maximale atteinte par les vagues par rapport au niveau moyen de la mer) est estimé néanmoins dans quelques études par des formules empiriques simples.

La méthode utilisée dans le PPR de Terre-de-Bas et Terre-de-haut aux Saintes suit par exemple les recommandations du « *Coastal Engineering Manual* » (CEM) édité par le *US Army Corps of Engineers* en remplacement du « *Shore Protection Manual* », qui conseille par exemple de se référer aux lois de Ahrens (1981) dans le cas des fortes pentes ($1/4 < \tan\alpha < 1/1$). Les formules de De Waal et Van Der Meer (1992) sont recommandées dans le cas des pentes un peu plus douces ($1/8 < \tan\alpha < 1/3$). Elles font intervenir la longueur d'onde et la hauteur significative de la houle, de même que la pente de la plage.

Certains PPR, comme celui de la commune de Côte-sous-le-vent (Guadeloupe), déterminent la hauteur significative de houle au droit du littoral, le *run-up* et la sur-verse (*overtopping*) à l'aide du logiciel CHAMP (*Coastal Hazard Analysis Modeling Program*), conçu par l'*US Army Corps of Engineers* pour les besoins de l'Agence Américaine de Gestion des Crises (*Federal Emergency Management Agency*). Les principaux éléments théoriques à l'origine des modèles de calcul utilisés par CHAMP proviennent de :

- la ré-analyse de tests de *run-up* à petite échelle en laboratoire pour des ondes régulières sur des pentes douces, imperméables et uniformes (Stoa, 1978),
- l'étude de Saville (1958) sur des pentes hétérogènes,
- les coefficients de rugosité donnés par le Shore Protection Manual.

Une étude récente de submersion marine menée par le BRGM à la Réunion (De la Torre et Louze, 2008) propose d'utiliser plusieurs formules de *run-up* et de prendre la

plus adaptée en fonction de la vraisemblance des résultats sur le terrain à dire d'expert et de la comparaison des ordres de grandeur obtenus à l'aide du logiciel ACES développé par le *US Army Corps of Engineer*. Les conclusions de cette étude indiquent que les formules de Holman (1986) et Nielsen et Hanslow (1991) semblent donner les résultats les plus cohérents pour les plages de pentes faibles. En revanche, la formule de Stockdon *et al.* (2006) paraît plus adaptée pour les cordons littoraux dont la pente est importante. Les formules de Mase (1989) donnent apparemment des valeurs de *run-up* largement surestimées.

Remarquons que la plupart des formules mentionnées ci-dessus ne s'appliquent qu'à des cordons littoraux. Les zones aménagées (enrochements, talus en BCR, digues...) sortent de leur domaine d'application. Des formules de *run-up* applicables à ce type de côte existent mais demeurent en général trop théoriques pour fournir des résultats précis.

De même que pour le *setup*, il est difficile d'évaluer les incertitudes associées au jet de rive pour chacune des formules évoquées ci-dessus. En l'absence de modèles numériques complexes, elles donnent néanmoins un ordre de grandeur, mais il est préférable toutefois de les coupler avec des jugements d'expert pour chaque zone d'étude.

Avis d'experts

Lorsque la configuration du littoral présente des caractéristiques particulières, que les modèles numériques et analytiques ne donnent pas des résultats satisfaisants, par manque de données ou encore dans le cas d'une évaluation sommaire de l'aléa, il est possible de faire appel à des avis d'expert pour quantifier les contributions au niveau de référence. Dans l'étude PPR de Capesterre et Belle-Eau, une surcote de 0 à 40 cm est ainsi attribuée pour quantifier l'ensachage derrière un récif ou une cayé, selon la morphologie des hauts-fonds. Une autre surcote est allouée par ailleurs à chaque site selon son exposition, la pente des fonds et la forme du rivage (par exemple, 0 m au niveau des pointes et jusqu'à 40 cm en fond de baie ou d'anse).

2.2.3. Les différentes données topographiques utilisées

Dans la méthode préconisée dans le Guide d'élaboration des PPR, les niveaux d'eau extrêmes sont comparés avec les données topographiques disponibles. La résolution et la précision des données topographiques conditionnent largement la qualité des résultats obtenus pour cartographier la zone inondable tout comme les hauteurs de submersion auxquelles on peut s'attendre. Les différents types de données altimétriques utilisées dans les études pour évaluer la submersion marine sont présentées ci-dessous.

Modèle Numérique de Terrain de l'IGN

La BD ALTI de l'IGN est une base de données altimétriques disponible sur l'ensemble du territoire français. Elle correspond, dans sa version la plus précise, à une grille de 50 m de résolution avec une résolution verticale métrique. Les valeurs altimétriques

pour chaque maille (valeur entière au mètre) sont déterminées à partir des courbes de niveau et des points cotés des cartes IGN. La BD TOPO Pays repose sur une grille au pas de 25 m constituée à partir de la BD ALTI. Elle permet d'avoir accès à une résolution altimétrique supérieure en agglomération.

Ces données ne sont pas suffisamment précises pour réaliser une cartographie fine des zones soumises à l'aléa submersion marine, mais peuvent servir en revanche dans le cadre d'une évaluation préliminaire.

Parmi les études utilisant ce type de données, on trouve par exemple le PPR de Saint-François (Guadeloupe), *l'Étude de l'évolution du trait de côte du littoral des Alpes-Maritimes* (CRIGE-PACA, 2007) ou encore le PPR des communes de Terre-de-Bas et Terre-de-haut aux Saintes.

DGPS (Differential Global Positioning System)

Des levés topographiques de précision centimétrique peuvent être réalisés à l'aide du GPS différentiel (DGPS) qui utilise un réseau de stations fixes de référence transmettant l'écart entre leur position réelle connue et la position indiquée par les satellites (ex : Suarez *et al.* (2006), Anselme *et al.* (2008), Cariolet et Suarez (2009), *Mise en œuvre d'une politique de prévention des risques de submersion marine dans le Morbihan* (2003,2004), *Étude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer* (2004), etc.).

D'une grande précision, les données acquises à l'aide du DGPS ont malheureusement un coût très élevé surtout dès que les surfaces à couvrir deviennent importantes

LIDAR

Il est possible d'obtenir des données topographiques et bathymétriques de précision décimétrique avec une résolution inférieure au mètre par levés lasers aéroportés (LIDAR). Cette technique fonctionne selon un principe similaire à celui du radar : il s'agit d'envoyer un signal lumineux et de mesurer l'intervalle de temps entre l'émission et la réception de la lumière rétrodiffusée, puis d'en déduire l'altitude du point insolé connaissant la position de l'avion. Le LIDAR a l'avantage (par rapport au DGPS notamment) de pouvoir couvrir rapidement des zones très étendues. Il est particulièrement adapté pour obtenir des données topographiques, dans la zone de l'estran et même de faible bathymétrie (inférieures à 40 m). Il ne permet pas en revanche de mesurer la bathymétrie dans les zones à forte turbidité.

Des levés systématiques ont été réalisés sur les côtes basses en Angleterre, aux Pays Bas et en Belgique. En France, il existe quelques levés localisés sur le littoral, dans l'Hérault par exemple, la région Nord Pas de Calais, ou encore certains Départements d'Outre-Mer comme la Réunion et Mayotte.

Un programme national de cartographie précise de l'interface terre-mer à l'aide du LIDAR a été lancé par ailleurs par le SHOM et l'IGN : Litto3D (voir ci-dessous).

Données Litto3D

Litto3D est un programme national de cartographie du littoral lancé par le SHOM et l'IGN. Il a pour objectif de produire un modèle numérique altimétrique continu de l'interface terre-mer de résolution métrique (avec une précision de l'ordre de 20 cm pour la topographie et 50 cm pour la bathymétrie) à l'aide de lasers aéroportés et de sondeurs multifaisceaux.

Ce programme a été testé sur le golfe du Morbihan et la région de Toulon. L'acquisition de données est en cours dans d'autres secteurs comme la Réunion.

La mise en œuvre de ce projet ouvre (pour les secteurs qui en seront dotés) de nouvelles perspectives en matière de cartographie de l'aléa submersion marine. Elle donnera en effet la possibilité d'appliquer des modèles numériques complexes permettant de mieux estimer les surcotes et de simuler l'inondation de manière plus réaliste.

Autres

Lorsque les données topographiques disponibles ne sont pas suffisamment précises pour cartographier l'aléa, on peut aussi faire le choix de rassembler des données complémentaires de précision centimétrique, auprès de géomètres par exemple (ex : PPR Côte-sous-le-vent de Guadeloupe, Anselme *et al.* (2008), AZI Languedoc-Roussillon).

Une autre solution consiste à utiliser la photogrammétrie, technique qui permet de reconstituer le relief d'une scène en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents (ex : PPR des communes de Terre-de-Bas et Terre-de-Haut, Suanez *et al.*, 2006).

2.2.4. Zonage et caractérisation de l'aléa

Prise en compte des ouvrages et protections naturelles

Les études appliquant la méthode de croisement des données topographiques avec un niveau d'eau de référence ne tiennent souvent pas compte des ouvrages de protection dans la détermination de l'aléa. Selon le Guide d'élaboration des plans de prévention des risques submersion marine en Languedoc-Roussillon, on ne peut pas avoir de garantie absolue sur l'efficacité des ouvrages, et il peut toujours survenir un événement plus impactant que celui pris en compte pour leur dimensionnement. Il conclut donc qu'il serait préférable de se contenter d'étudier le cas d'un scénario « maximisant » pour lequel on ne considère pas les ouvrages pour l'établissement des cartes d'aléa.

On recense cependant quelques travaux qui tiennent compte des ouvrages à partir de jugements d'experts. Dans l'étude PPR sur la commune de Saint-François en Guadeloupe, on considère ainsi que la largeur de la région « d'aléa fort » dépend par exemple de la présence ou non d'une digue. Des considérations similaires sont

appliquées dans le PPRL de l'île-de-Cayenne (BRGM, 2000), de la commune de Capesterre-Belle-Eau (Guadeloupe), etc.

La problématique est assez similaire en ce qui concerne les protections naturelles, comme un cordon dunaire. Peut-il y avoir franchissement des vagues ? Création d'une brèche ? La plupart des études éludent ce type de problème. Les protections naturelles ne sont prises en compte que dans la mesure où elles sont représentées par les données topographiques.

On trouve néanmoins plusieurs travaux évoquant la possibilité de création d'une brèche dans un cordon dunaire. En l'absence de critères objectifs permettant d'évaluer la probabilité d'un tel événement, on fait le choix en général d'un scénario « maximisant », pour lequel la dune ne joue plus son rôle de protection naturelle. En pratique, cela revient à ne pas tenir compte de celle-ci dans les données topographiques (ex : méthode « globale » dans l'Atlas des risques côtiers pour le Morbihan ; Chaverot, 2005 ; etc.).

Principaux critères pour caractériser le zonage

Le principal critère utilisé pour le zonage de l'aléa submersion marine est la hauteur d'eau. Les vitesses d'eau et la durée d'inondation sont reconnues comme étant aussi des paramètres importants, mais sont souvent difficiles à estimer en l'absence de modèles numériques évolués. Les valeurs retenues pour caractériser l'intensité de l'aléa reposent sur le jugement d'expert et les expériences passées. Il en va souvent de même pour déterminer l'effet des ouvrages ou des protections naturelles comme les zones de mangrove. Il n'est pas évident de privilégier une approche plutôt qu'une autre, compte tenu de la spécificité de chaque secteur d'étude.

Les exemples ci-dessous, repris en partie dans le Tableau 2, attestent de la diversité des démarches adoptées pour caractériser l'aléa :

- *PPR de Plouguerneau* : l'aléa est supposé faible si la hauteur d'eau H_e (i.e. l'écart entre la topographie et le niveau de référence) est inférieure à 1m, moyen si $1\text{ m} < H_e < 2\text{ m}$, et fort si $H_e > 2\text{ m}$. Le niveau d'aléa est plus élevé dans les zones où on s'attend à des vitesses d'écoulement de l'eau importantes (en cas de brèche dans un polder par exemple). Il est nul si l'altitude de la région considérée est supérieure au niveau de référence (c'est le cas d'ailleurs pour l'ensemble des études) ;
- *Élaboration PPRN prévisibles, communes de l'Anse-Bertrand, Port-Louis et Petit-Canal (Guadeloupe)* : cette étude distingue l'aléa « houle », correspondant à l'impact des vagues, de l'aléa « submersion » associée à la montée du niveau moyen de la mer. L'aléa de submersion est considéré comme étant fort pour les zones submergées par plus de 1 m d'eau, et moyen dans le cas contraire. La définition du niveau d'aléa « houle » est essentiellement fonction de la remontée des fonds (si les fonds remontent brusquement les vagues acquièrent beaucoup de puissance et seront d'autant plus dévastatrices) et de la nature des matériaux qui constituent le rivage (les zones recouvertes de blocs peuvent subir leur impact si les vagues sont suffisamment fortes). L'aléa houle est considéré par ailleurs comme nul dans les zones de mangrove et après la première rangée de maisons dans les

zones urbanisées, les vagues étant alors supposées perdre rapidement de leur énergie. Remarquons que les deux aléas sont en outre fonction « des dommages aux biens et du risque encouru par les personnes en cas de cyclone ». Il s'agit donc dans ce cas de figure d'une cartographie du *risque*, plutôt que de l'aléa ;

- *PPR Saint-François (Guadeloupe)* : cette étude distingue les zones exposées au déferlement des houles cycloniques (classées en aléa fort) des zones exposées uniquement à la montée du niveau de la mer (classées en aléa moyen). La largeur de la zone d'aléa fort dépend de la présence ou non d'ouvrages, et l'aléa décroît à mesure que l'on s'éloigne du rivage ;
- *PPR des communes de Terre-de-Bas et Terre-de-haut aux Saintes* : les niveaux d'aléa sont définis de la façon suivante :
 - Aléa fort : zones situées à moins de 10 m du rivage OU exposées à des vagues supérieures à 1 m OU situées plus d'un mètre sous le plan d'eau surélevé moyen OU exposées à des vitesses d'eau importante ($> 0,5$ m/s),
 - Aléa moyen : zones non classées en aléa fort exposées à des vagues supérieures à 50 cm, OU situées à plus de 50 cm du plan d'eau surélevé moyen,
 - Aléa faible : zones submergées non classées en aléa fort ou moyen,
 - Aléa nul ou négligeable : zones non submergées ;
- *Guide PPR LR* : L'aléa est considéré comme fort dans la « zone du déferlement », c'est-à-dire la zone directement soumise à l'impact des vagues (cordon dunaire, plage vive, plage immergée), dont la délimitation, qui intègre des données morphologiques et historiques, doit être menée au cas par cas. Il est aussi considéré comme fort dans les autres régions dont l'altitude Z est inférieure de plus de 50 cm au niveau extrême estimé (c'est-à-dire $Z < 1,5$ m NGF dans cette étude). L'aléa est modéré si cette différence est inférieure à 50 cm (*i.e.* $1.5 \text{ m NGF} < Z < 2 \text{ m NGF}$) ;
- *PPR Côtes basses meubles du Pas-de-Calais* : Les zones d'aléa « fort à moyen » sont définies comme des zones où des submersions sont prévisibles d'ici 10 ou 15 ans du fait de la proximité de la mer et d'un système de défense peu fiable. Les zones d'aléa « moyen » sont constituées des zones basses comprises entre les zones d'aléa « fort à moyen » et les anciennes digues qui pourraient permettre de contrer en partie l'avancée des eaux. Les zones d'aléa « faible » sont celles dont l'altitude est située sous le niveau marin de référence mais pour lesquelles on ne recense pas d'incursions marines récentes ;
- *PPR de l'île de Cayenne* : Le degré d'aléa est estimé par avis d'experts à partir des inondations historiques. L'aléa est considéré comme fort sur les côtes non protégées par des ouvrages et ouvertes aux houles de secteur nord-est et nord pour lesquelles les submersions par projection d'eau sont fréquentes en période de forte agitation de la mer et de grande marée. Il l'est aussi derrière les ouvrages, mais uniquement sur une bande côtière de 10-20 m. Les zones d'aléa « moyen à faible » correspondent à celles ayant subies des submersions modérées dans le passé, ou encore les zones de mangrove ou les marais situées sous le niveau de référence ;

Submersion						Houle/Déferlement			
Aléa	Exemple type	Fort	Moyen	Faible	Modulé		Fort	Moyen	Faible
Type 1	PPR inspirés du guide méthodologique	HSub > 2 m	1 m < HSub < 2 m	HSub < 1 m	Par les vitesses (sans précision)		Non pris en compte		
Type 2	Anse Bertrand, PortLouis, Petit Canal (Gua)	Hsub > 1 m	Hsub < 1 m		Non	Fonction de la remontée du fond et de la nature du rivage, aléa nul si mangrove ou zone après la première rangée de constructions			
Type 3	Saint-François (Gua)	Zone de déferlement	HSub > 0 m			Intégré dans zonage submersion (largeur de la zone fonction de la présence d'ouvrages) aléa décroissant en fonction de la distance du rivage			
Type 4	Terre de Bas, Terre de Haut (Saintes)	Dist < 10 m rivage OU HVagues > 1 m OU Hsub > 1 m OU Veau > 0,5 m/a	HVague > 0,5 m OU Hsub < 0,5 m	0,5 m > HSub > 0 m		Intégré dans zonage submersion			
Type 5	PPR LR	Zone de déferlement OU HSub > 0,5 m		HSub < 0.5 m		Intégré dans zonage submersion			
Type 6	PPR Côtes basses meubles Pas-de-Calais	submersions prévisibles d'ici 10 ou 15 ans du fait de la proximité de la mer et d'un système de défense peu fiable	zones basses comprises entre les zones d'aléa «fort à moyen» et anciennes digues	Z < NivMarinRef mais pour lesquelles on ne recense pas d'incursions marines récentes		Non pris en compte			
Type 7	PPR Ile de Cayenne	côtes non protégées par des ouvrages et ouvertes aux houles de secteur Nord-est et Nord, submersions constatées	Submersions modérées dans le passé, Mangroves ou marais Z < NivMarinRef			Non pris en compte			
Type 8	PPR Réunion	Z < NivMarinRef	Zones artificialisées, en arrière zone aléa fort			Non pris en compte			

Tableau 2 - Exemples de critères de caractérisation de l'aléa submersion marine.

- *Étude BRGM à la Réunion* (De La Torre *et al.*, 2008) : L'aléa est considéré comme fort pour toutes les zones situées sous le niveau extrême de référence. La classification d'un secteur en aléa moyen permet l'établissement d'une marge de sécurité, par exemple au droit d'une zone constituée d'enrochements, en retrait immédiat d'une zone classée en aléa fort. Compte tenu de l'absence d'informations précises au niveau des zones artificialisées, celles-ci ont été classées systématiquement en aléa moyen (intérieur des ports, talus en BCR protégeant le port de commerce, etc.) ;
- *Projet européen EUROSION* : le degré d'exposition de la côte est déterminé en fonction de la surcote atmosphérique. Si la surcote est inférieure à 1,5 m on considère par exemple que l'exposition est faible. Elle est forte si la surcote est supérieure à 3 m et modérée dans les cas intermédiaires.

2.2.5. Remarques

Cette méthode a comme principale limite de ne pas tenir compte de plusieurs paramètres tel que le *setup*, le jet de rive, ou encore la présence d'ouvrages. Les données topographiques recommandées dans le guide méthodologique (BD TOPO IGN) ne sont en outre pas suffisamment précises pour une cartographie fine de l'aléa submersion marine.

La méthode de croisement des niveaux extrêmes avec la topographie a été mise en œuvre de façon très variée dans l'ensemble des PPR ou elle a été appliquée. Le zonage d'aléa qui en découle a comme nous l'avons montré précédemment été réalisé avec des critères variables d'une étude à l'autre. De ce fait, l'agrégation de toutes ces PPR ne permettrait pas d'avoir une restitution homogène aux échelles régionales et nationale.

2.3. LA MÉTHODE « ZONES BASSES » À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE

Une seule étude a évalué l'emprise maximale de la submersion marine de manière homogène sur l'ensemble du linéaire côtier de la France métropolitaine. Elle a été réalisée par le CETMEF et le CETE (Ouest et Méditerranée) au cours de l'année 2009. Ces travaux ne s'appliquent pas en revanche aux Départements d'Outre-Mer.

La méthode utilisée est classique et basée sur le croisement des niveaux extrêmes avec la topographie comme dans le cas des PPR mais l'échelle à laquelle elle a été appliquée (France métropolitaine) nous a conduits à la traiter individuellement.

2.3.1. Niveaux extrêmes de référence

Les niveaux marins centennaux retenus pour la Manche et la façade Atlantique sont issus de l'étude « Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique » du SHOM/CETMEF, mise à jour en 2008. Les isolignes des cartes SHOM/CETMEF (voir Figure 6) sont tout d'abord numérisées sous forme de poly-

lignes en se restreignant aux courbes de niveau de valeur entière et demi-entière (2,5 m, 3 m, 3,5 m, 4 m, etc.). Les poly-lignes de valeurs demi-entières (2,5 m, 3,5 m, 4,5 m,...) sont ensuite prolongées sur terre jusqu'à une altitude de 11,5m, permettant de délimiter les zones pour lesquelles le niveau d'eau extrême à la côte est compris entre 2,5 m et 3,5 m, 3,5 m et 4,5 m, 4,5 m et 5,5 m, etc.

Enfin, le littoral est découpé en zones caractérisées par des intervalles de valeurs de niveaux marins centennaux à la côte (2,5 m-3,5 m, 3,5 m-4,5 m, etc., voir Figure 10).

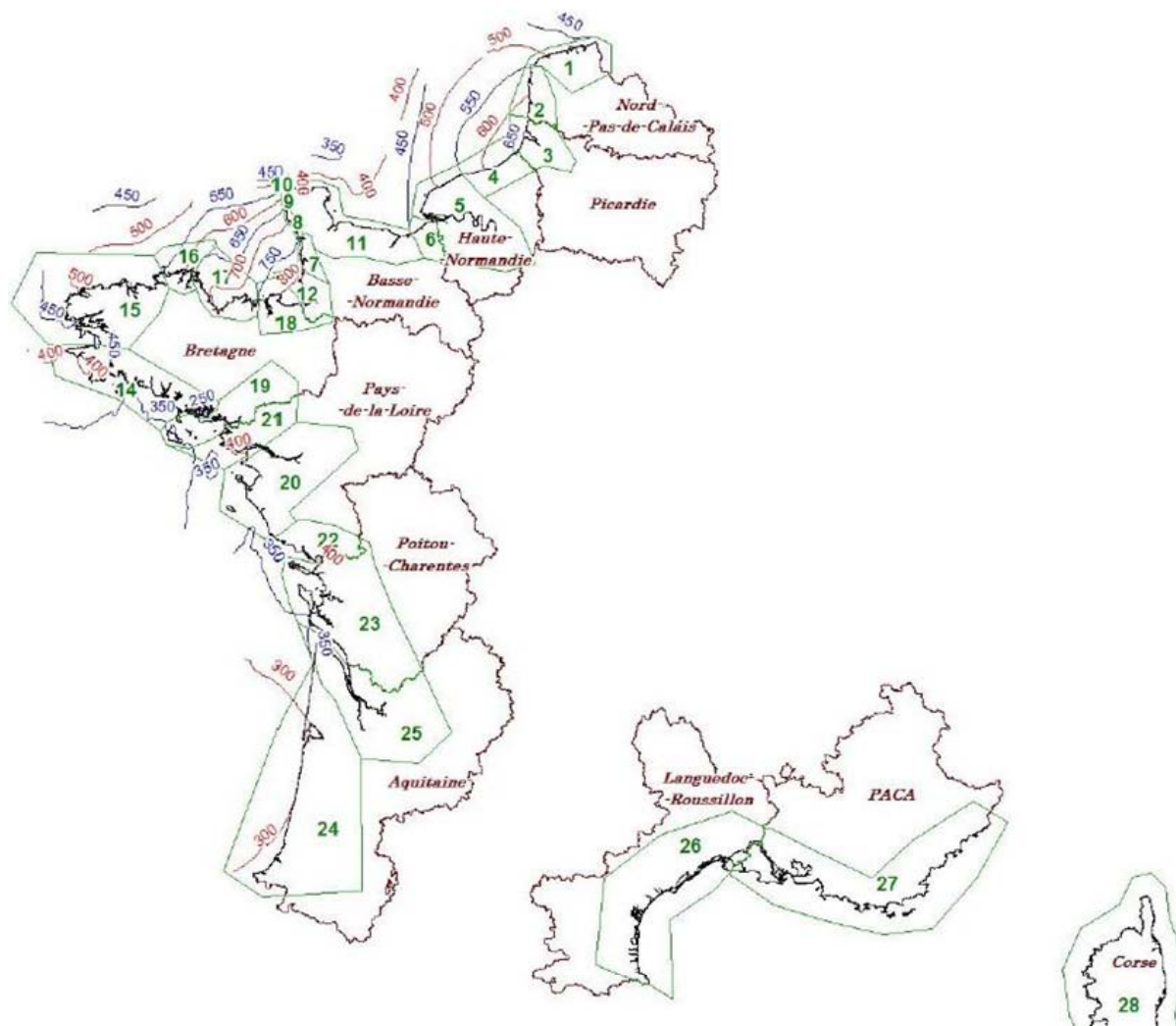


Figure 10 - Zones d'iso-valeurs de niveaux marins de référence (vert).

La zone 4 correspond par exemple à un niveau d'eau compris entre 5,5 m et 6,5 m. Pour les zones 26, 27 et 28, on considère que ce niveau est compris entre 0 m et 1,5 m. Les courbes de niveaux marins déduites de l'étude du SHOM/CETMEF et utilisées pour le zonage sont données en rouge et bleu.

La Méditerranée est traitée différemment du fait de l'absence de données de niveaux d'eau extrêmes sur l'ensemble de la côte. Une valeur arbitraire de + 1,5 m NGF a été attribuée au niveau marin extrême en s'appuyant sur les résultats des études existantes (Guide d'élaboration des PPR submersion marine en Languedoc-Roussillon,

rapport « Elaboration d'un Plan de Prévention des Risques Submersions Marines en Camargue. Etat des lieux des données existantes » réalisé par le CETE Méditerranée, etc.).

2.3.2. Topographie

Les données topographiques sont issues du MNT BD Topo Pays et du trait de côte Histolitt. Les fichiers MNT BD Topo Pays sont assemblés par façade (on obtient donc une mosaïque pour la façade Méditerranée et une autre pour la façade Atlantique-Manche).

L'extension « Spatial Analyst » de la gamme ArcGis est ensuite utilisée pour générer des courbes de niveau d'altitude demi-entières : 0,5 / 1,5 / 2,5 / 3,5 / 4,5 et 5,5 m. Ces courbes sont utilisées pour créer des zones hypsométriques (des « polygones ») regroupant l'ensemble des points entre 2 altitudes données : 0.5-1,5 m, 1,5-2,5 m, 2,5-3,5 m, etc.

2.3.3. Croisement du niveau de référence avec la topographie

La phase finale du traitement consiste à croiser la topographie, les zones « d'iso-valeurs » du niveau marin centennal, et les limites de régions. Les résultats finaux sont fournis sous forme de polygones. Ceux pour lesquels l'altitude est inférieure au niveau marin centennal sont identifiés comme des « zones basses » susceptibles d'être inondées.

2.3.4. Remarques

Cette démarche a l'avantage de reposer sur des données disponibles, qu'il s'agisse de la topographie (BD Topo Pays) ou des niveaux marins extrêmes (étude SHOM-CETMEF, 2008). Elle peut donc être appliquée sans avoir recours à des campagnes de mesure coûteuses ou des calculs statistiques complexes. Elle ne permet pas en revanche d'obtenir une cartographie précise de l'aléa, compte tenu du manque de précision des données. On peut s'attendre à ce qu'elle surestime ou sous-estime dans de nombreux cas l'emprise de la submersion. Les plaines littorales de faible altitude seront par exemple considérées comme inondables, même si elles sont protégées par cordon dunaire d'altitude élevée interdisant le franchissement des vagues.

On peut aussi reprocher à cette démarche l'absence de prise en compte des données historiques sur les inondations passées, qui permettraient notamment d'évaluer les limites du modèle. Le *setup* n'est pas considéré par ailleurs dans le calcul du niveau extrême sur la façade Manche-Atlantique. Les marégraphes utilisés dans l'étude SHOM-CETMEF pour les calculs de niveau marin ne mesurent en général qu'une petite partie de la surcote due aux vagues. Or celle-ci peut atteindre des valeurs tout à fait significatives, de l'ordre du mètre (voir par exemple Lebreton et Perherin, 2009). Si l'on compare les niveaux d'eau extrêmes prédits par l'étude CETE-CETMEF avec ceux déterminés par des travaux récents à plus grandes échelles, on constate qu'ils sont presque systématiquement sous évalués. Par exemple, selon Cariolet et Suanez

(2009), les niveaux extrêmes centennaux pour les plages du Vougot et de Boutrouilles dans le Finistère nord atteignent respectivement 5,88 m NGF et 6,44 m NGF, alors qu'ils sont évalués entre 4,50 et 5,50 m NGF d'après l'étude CETE-CETMEF. L'échelle spatiale de variation du *setup* (les plages du Vougot et de Boutrouilles ne sont séparées que de quelques kilomètres) et son amplitude (de l'ordre du mètre donc) remettent d'ailleurs en question le découpage du littoral en segments pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres.

Par ailleurs, la valeur retenue pour le niveau extrême en Méditerranée peut sembler relativement faible si l'on se réfère à certaines études ou événements historiques. Le Guide d'Élaboration des PPR-SM en Languedoc-Roussillon préconise plutôt un niveau de +2 m NGF, voir une valeur plus importante dans les cas où une cote supérieure a été observée. Lors de la tempête de 1999, la présence de troncs d'arbre bloquant la voie ferrée (située entre 2,8 et 3 m NGF) à la station balnéaire de La Franqui et l'échouage d'un navire de commerce avec un tirant d'eau de 3 m suggèrent en effet que la mer peut dépasser ce niveau en certains endroits (Anselme *et al.*, 2008). Anselme *et al.* (2008) rappellent à ce propos qu'une simple analyse historique combinée avec des données enregistrées (marégraphes, échelles à marée, etc.) ne suffit pas toujours pour évaluer les niveaux extrêmes, étant donné le manque de données disponibles et leur manque de précision. Dans le cas de leur étude sur l'étang de La Palme, l'aléa submersion établi de cette manière est assez largement sous-estimé.

La démarche développée par le CETE-CETMEF paraît toutefois envisageable dans le cadre d'une étude préliminaire de l'aléa submersion marine à l'échelle de la France, à condition d'y apporter quelques modifications. Nous détaillerons cet aspect ultérieurement (4.2).

2.4. MÉTHODE HYDRO-GÉOMORPHOLOGIQUE

2.4.1. Présentation

L'approche hydro-géomorphologique élaborée par le CETE Méditerranée pour la réalisation de « l'Atlas numérique des zones inondables par submersion marine du littoral sableux du Languedoc Roussillon » s'inspire de la démarche naturaliste adoptée pour les inondations fluviales, qui permet d'identifier les enveloppes des zones inondables pour différentes fréquences d'événements, et dont le principe est le suivant :

- les différentes unités géomorphologiques d'une plaine alluviale sont mises en évidence à partir d'études de terrain et en s'appuyant sur la photo-interprétation (ex : lit mineur, lit majeur... ; Figure 11) ;
- on distingue celles qui appartiennent à la partie active du cours d'eau (zone inondable) et celles qui sont hors de la zone active et donc hors zone inondable (les terrasses, le substratum...) ;
- les unités géomorphologiques de la partie active sont chacune associées à une gamme de crue : le lit mineur correspond aux crues très fréquentes, le lit moyen à

des crues dont la période de retour est comprise entre 2 et 10 ans, le lit majeur aux crues exceptionnelles, etc. ;

- on obtient donc les enveloppes des zones inondables pour différentes fréquences d'évènements.

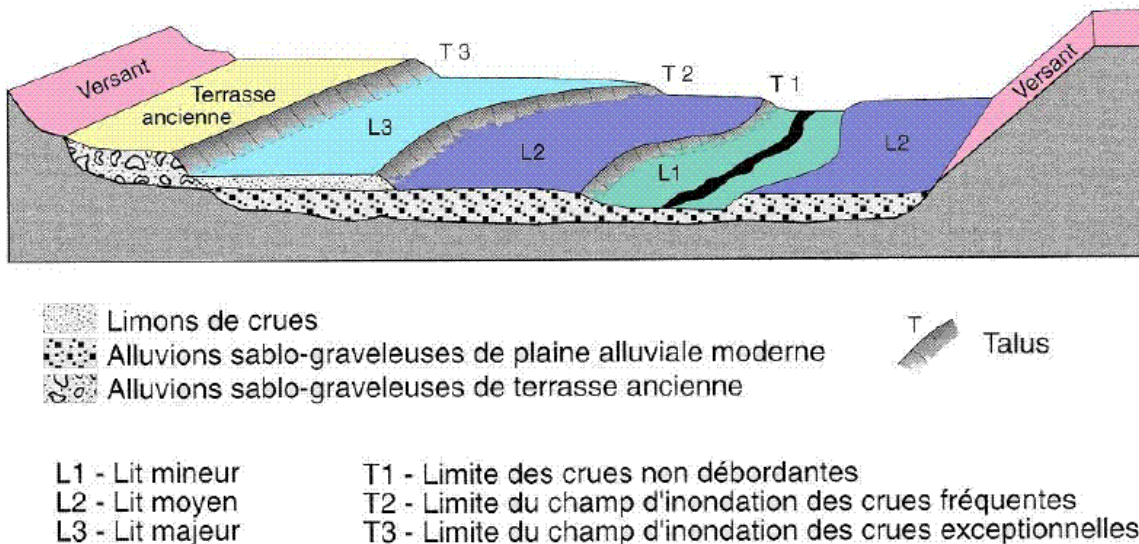


Figure 11 - Coupe transversale d'une plaine alluviale.

(source : MATE/METT, 1996 modifié, voir Atlas numérique des zones inondables par submersion marine – Littoral sableux du Languedoc Roussillon – 2008)

La méthode développée par le CETE Méditerranée est une adaptation de cette approche au domaine de la submersion marine : il s'agit essentiellement de mettre en évidence et de cartographier les formations caractéristiques du milieu littoral (plage vive, cordon dunaire, plaine littorale...) à l'aide de la photo-interprétation et d'études de terrain, puis d'attribuer un aléa pour chacune d'entre elles de manière qualitative. Cette approche a été testée dans un premier temps sur quatre secteurs : Palavas-les-Flots, Banyuls sur mer, Argelès-sur-Mer, et Valras-plage. Le CETE Méditerranée l'a appliqué par la suite à l'ensemble du littoral du Languedoc-Roussillon : l'Hérault, le Gard, les Pyrénées Orientales et l'Aude.

2.4.2. Méthode

Il s'agit dans un premier temps de délimiter la zone d'étude. Pour le Languedoc-Roussillon, seules les régions situées à une altitude inférieure à 5 m NGF ont été prises en compte. On considère que les autres ne sont pas susceptibles d'être inondées. La courbe de niveau à 5 m et le trait de côte sont issus dans cette étude de la base de données BD TOPO.

Vient ensuite une première phase d'analyse de la zone d'étude, qui consiste à :

- faire la synthèse des aménagements et ouvrages susceptibles d'intervenir dans le fonctionnement hydraulique du littoral, comme les brise-lames, épis, digues, quais, barrages, voiries, etc. ;
- rassembler les données topographiques à disposition : BD TOPO Pays, géomètres, etc. ;
- faire la synthèse des données historiques disponibles sur la submersion marine (stations de mesure de la houle et des hauteurs d'eau, arrêtés de catastrophes naturelles, archives de presse, photographies, évolution du trait de côte...) ;
- rassembler les cartes géologiques (au 1/50 000), géomorphologiques (1/50 000 ou 1/100 000), ou encore les photographies aériennes correspondant à la zone d'étude (qui seront interprétées par stéréoscopie).

Ces informations sont assemblées et croisées dans un SIG dans le but d'identifier et de cartographier les unités spatiales homogènes du littoral, en particulier les unités hydrographiques (zone marine, cours d'eau, étangs, etc.), actives (plaine alluviale, cordon littoral, plaine littorale) ou encore les unités encaissantes (terrasses alluviales, versants, colluvions...). La « plage vive » est identifiée par exemple en faisant une extraction sur le toponyme « sable sec » de la table « occupation des sols » (OCC_SOL_SURF) de la BD TOPO, et en croisant la surface obtenue avec celle générée par la table « zone marine » (S_MARS). La surface restante entre la « plage vive » et les étangs (lorsqu'ils existent) correspond au « cordon dunaire ». Sa géométrie exacte dépendra de l'analyse des informations lithologiques contenues dans les cartes géologiques du BRGM au 1/50 000.

Les résultats sont ensuite vérifiés et complétés par des études de terrain.

La seconde phase consiste à attribuer un aléa à chacune des unités géomorphologiques identifiées et cartographiées lors de la première étape, de manière qualitative (voir Tableau 3). Elle repose donc essentiellement sur des avis d'expert et s'appuie dans une large mesure sur les données historiques recueillies.

Element géomorphologique	Aléa				
	Nul	faible	moyen	fort	très fort
Plage vive					X
Dune				X	
Cordon littoral (premier plan)				X	
Cordon littoral (second plan)			X		
Plaine littorale			X		
Cordon littoral (autres plans)		X			
Plaine alluviale		X			
Formation Encaissantes	X				

Tableau 3 - Classification générale de l'aléa dans la zone littorale sableuse (étude Languedoc-Roussillon).

La Figure 12 montre la carte d'aléa obtenue par cette méthode pour le département de l'Hérault (jaune = aléa faible, orange = aléa moyen, rouge = aléa fort à très fort).

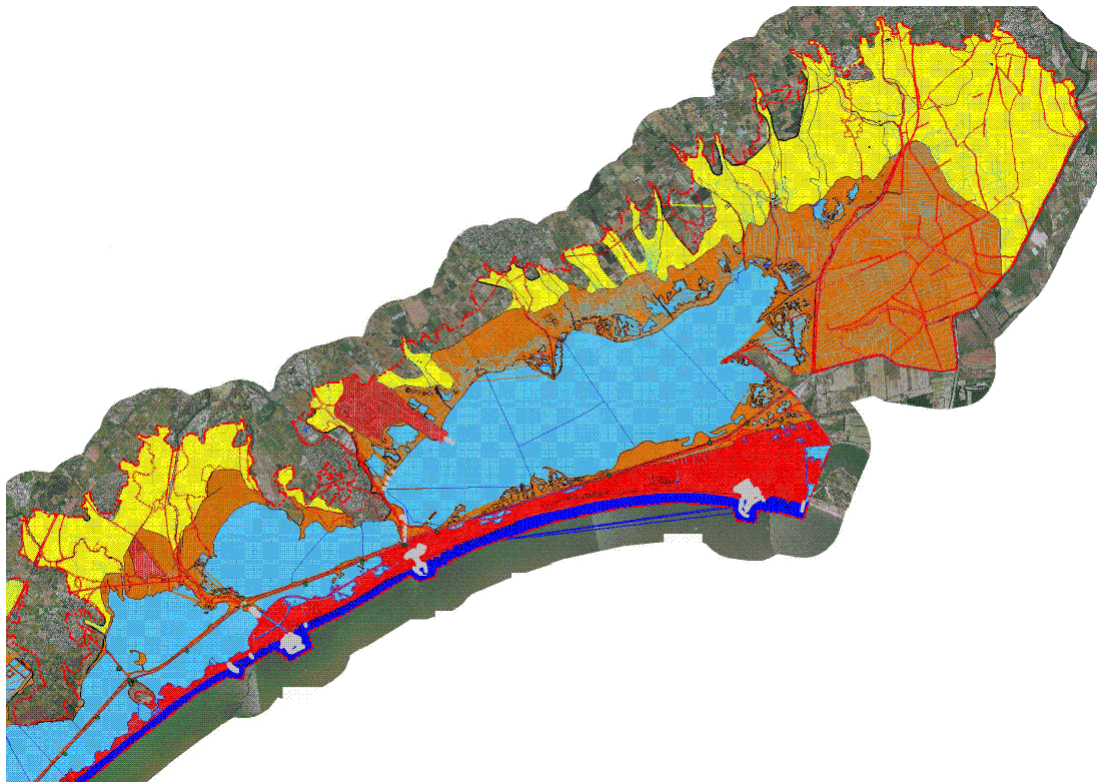


Figure 12 - Carte d'aléa de l'Est de l'Hérault, selon l'Atlas des Zones Inondables Languedoc-Roussillon (méthode hydrogéomorphologique).

Jaune : aléa faible ; orange : aléa moyen ; rouge : aléa fort ; bleu clair : réseau hydrographique surfacique (canal, étang, lac...) ; bleu foncé : zone marine

2.4.3. Remarques

Cette méthode semble donner des résultats cohérents dans les zones où elle a été mise en œuvre. Sur le littoral allant de Palavas-les-Flots à la Grande Motte (voir Figure 12), il est raisonnable par exemple d'attribuer un aléa fort à l'ensemble du lido, et modéré de l'autre côté des étangs. Il n'est pas certain en revanche que cette méthode puisse être appliquée facilement à l'ensemble du littoral français. Elle repose en effet sur un postulat discutable, puisque les unités géomorphologiques côtières (cordon dunaire, plaine littorale...) n'ont pas nécessairement générés par les processus de submersion marine contrairement aux lits, aux dépôts et aux autres morphologies des rivières qui sont eux directement liés à la dynamique des rivières. Cette approche nécessite par ailleurs une très bonne connaissance du terrain afin de valider la cartographie élaborée par croisement des données, et pour pouvoir attribuer des niveaux d'aléa réalistes pour chaque unité géomorphologique identifiée. Elle paraît en outre difficilement applicable en cas d'importantes variations de la configuration du littoral le long de la côte. Il n'est pas très réaliste par exemple d'attribuer le même

niveau d'aléa derrière un cordon dunaire haut et large et un cordon étroit de faible altitude.

2.5. MÉTHODE NUMÉRIQUE-ANALYTIQUE

2.5.1. Présentation

Cette méthode a été élaborée par les bureaux d'étude DHI (Danish Hydraulics Institute) et GEOS dans le cadre d'une étude commanditée par la DDE du Morbihan, assistée par le CETMEF, afin de caractériser l'aléa submersion marine sur la grande plage de la commune de Gâvres. Elle consiste à associer modèles numériques 1D et 2D avec des formules analytiques afin de modéliser la plupart des processus dynamiques associés à la submersion : propagation des vagues du large jusqu'au littoral, franchissement des ouvrages de protection naturels et artificiels, simulation de l'inondation, en tenant compte de la présence éventuelle d'une brèche, voir de crues associées à la montée du niveau d'eau. DHI et GEOS se proposent à présent de l'appliquer sur d'autres sites dans le Morbihan, ainsi que pour l'ensemble du littoral du Nord-Pas de Calais.

C'est donc une approche très détaillée (probablement la plus ambitieuse mise en œuvre à ce jour sur les côtes françaises) mais qui nécessite de rassembler un grand nombre d'informations pour apporter une réelle plus-value par rapport à des méthodes moins élaborées. Il est nécessaire en particulier de disposer de données topographiques et bathymétriques précises pour le calcul de l'inondation.

2.5.2. Méthode

Elle consiste tout d'abord en une analyse détaillée de la configuration du littoral d'étude et des processus naturels et anthropiques susceptibles de l'affecter. Il s'agit notamment de recueillir toutes les informations disponibles sur :

- les principales unités morpho-sédimentaires du littoral et leur évolution dans le temps (ex : cordon dunaire) ;
- les ouvrages de protection (état, morphologie) ;
- les principales caractéristiques et les phénomènes naturels pouvant affecter le littoral (houle, vent, clapot, présence de cours d'eau, etc.) ;
- les tempêtes historiques et leurs conséquences (rupture d'ouvrages, inondations, dégâts) ;
- la topographie et la bathymétrie dans la zone d'étude.

Cette première étape permet en particulier de délimiter le périmètre d'étude précis pour lequel il sera nécessaire d'évaluer l'aléa submersion marine, ou encore de choisir une tempête de référence dont on pourra se servir pour calibrer et valider le modèle.

La modélisation en elle-même comporte plusieurs étapes.

- **Définition de l'évènement de référence**

L'évènement de référence est établi en suivant la méthode préconisée par le Département de l'Environnement du Royaume Uni (DEFRA), décrite par Hawkes (2005). Celle-ci consiste en une analyse statistique croisée des états de houle au large et des niveaux extrêmes, qui fournit pour chaque période de retour de l'évènement global des couples de valeurs de hauteur de houle au large/niveau d'eau (voir Figure 13). Le couple de valeurs retenu peut être déterminé en estimant le scénario le plus impactant pour une période de retour donnée (par exemple 100 ans) par jugement d'expert.

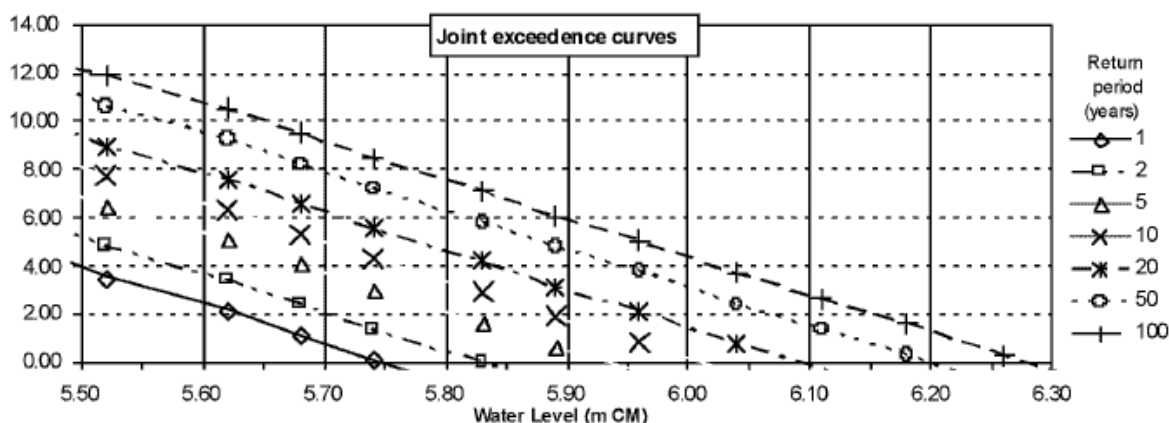


Figure 13 - Couples de valeurs « niveau extrême / hauteur de houle au large » à Grâves pour différentes périodes de retour de l'évènement global

En accord avec les recommandations du guide méthodologique « Plans de prévention des risques littoraux », l'évènement de référence choisi a une occurrence centennale. Les statistiques des niveaux marins extrêmes sont tirées des données et des études du SHOM. Les conditions de houle au large sont issues quant à elles de l'analyse des données de l'atlas ANEMOC.

- **Détermination des conditions de houle aux abords d'un site d'étude**

Les conditions de houle près du littoral sont calculées à l'aide d'un code spectral développé par DHI (MIKE 21 SW), qui permet de modéliser la formation ainsi que la propagation des vagues du large jusqu'aux abords d'un site d'étude (Figure 14) en fonction de la variation du champ de vent et des conditions de houle imposées aux limites du domaine de calcul.

La figure présente en couleur la variation de la hauteur significative des houles et les vecteurs indiquent la direction principale de propagation.

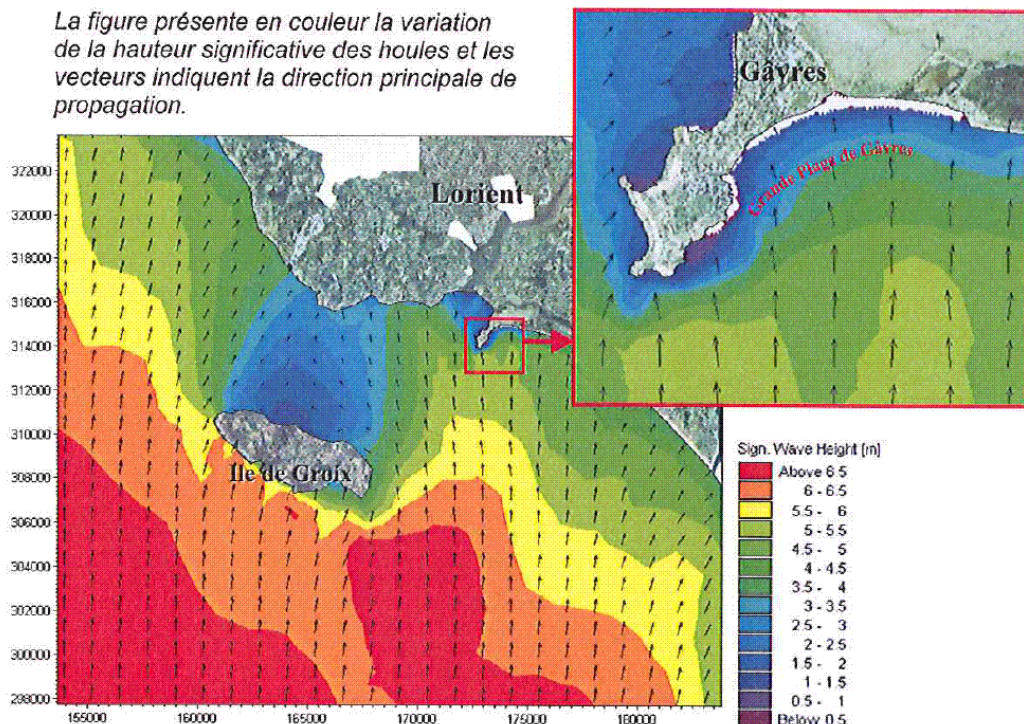


Figure 14 - Modélisation de la propagation de la houle à l'aide de MIKE 21 SW.

• Caractéristiques de la houle en pied d'ouvrage

Le linéaire de la côte est ensuite découpé en plusieurs secteurs, chacun représenté par un profil perpendiculaire au trait de côte. Ces profils intègrent à la fois la forme de plage et les ouvrages (Figure 15). Les résultats obtenus précédemment sont injectés dans le module de propagation des houles 1D de LITPACK afin de déterminer les caractéristiques de la houle en pied d'ouvrage ou au niveau du cordon dunaire.

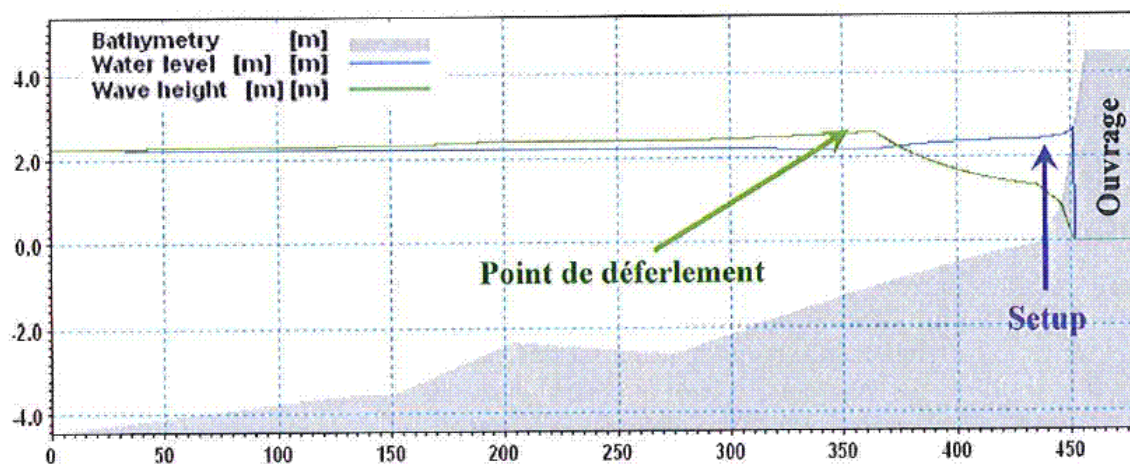


Figure 15 - Modélisation de la propagation de la houle le long d'un profil de plage.

• Calcul des débits en sur-verse au-dessus des ouvrages

Pour les sites identifiés comme ayant un risque de submersion lié au franchissement ouvrages par les vagues, les débits en sur-verse sont calculés à partir :

- des conditions de houle déterminées précédemment ;
- des niveaux d'eau atteints ;
- du profil de la plage et de la géométrie des ouvrages de protection en chaque instant de la marée en utilisant les formules empiriques du TAW (*Technical Advisory Committee for Water Retaining Structures*), qui prennent en compte le jet de rive sur l'ouvrage :

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_0 \exp \left(-4.3 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right)$$

avec :

- q : débit moyen généré par les vagues franchissant l'ouvrage,
- g : accélération de la pesanteur,
- H_{m0} : hauteur significative des vagues au pied de la digue,
- ξ_0 : paramètre de déferlement de la houle,
- $\tan \alpha$: pente moyenne du profil,
- R_c : hauteur entre le haut de l'ouvrage et le niveau d'eau de référence,
- γ : facteurs d'influence dépendant de la présence de berme et/ou d'un muret vertical, de la rugosité et de l'angle d'incidence de la houle.

Les flux franchissant les ouvrages de protection ou le cordon dunaire sont ainsi déterminés pour chaque profil puis intégrés sur le linéaire de chaque secteur pour en déterminer le débit total.

• Modélisation de l'inondation

La propagation des volumes d'eau franchissant les ouvrages de protection est modélisée numériquement à l'aide du logiciel MIKE 21 HD développé par DHI. C'est un code de calcul bidimensionnel, qui résout les équations Barré-de-Saint-Venant en différences finies pour les régimes transitoires. Les débits calculés précédemment sont imposés en conditions aux limites (ex : Figure 16). L'hypothèse d'une brèche dans un ouvrage de protection est considérée pour chaque site. Elle peut être prise en compte en modifiant le MNT de la zone étudiée, et en imposant un débit plus élevé aux frontières du domaine de calcul. Le modèle numérique peut aussi permettre de tenir compte des cours d'eau, en injectant par exemple un débit nominal comme condition d'entrée dans le modèle numérique.

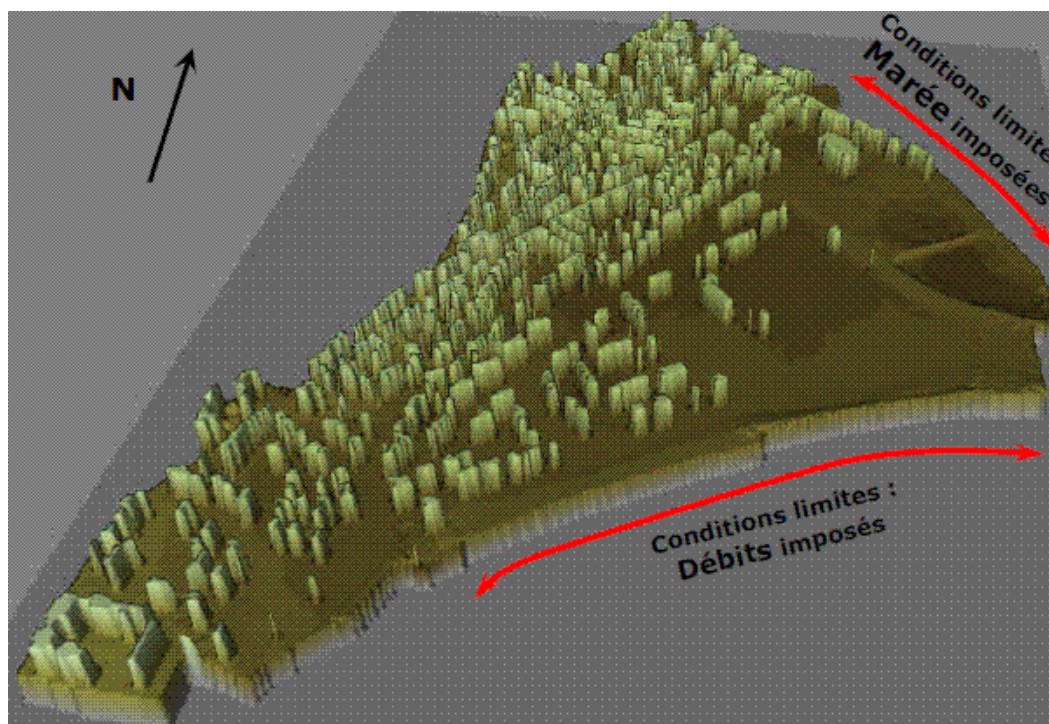


Figure 16 - Modèle MIKE 21 HD appliqué à la Grande Plage de Gâvres
(présentation P. Peeters au colloque « Nouvelles approches sur les risques côtiers »,
Paris, 30-31 janvier 2008).

Le code de calcul fournit, pour un évènement donné, à la fois les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement atteintes. Le croisement de ces valeurs permet de définir des classes d'aléa et d'en produire une cartographie à l'aide d'un SIG.

Cette méthode a été validée en comparant l'inondation observée avec celle obtenue par modélisation pour l'évènement du 10 janvier 2001.

2.5.3. Remarques

Une des principales critiques que l'on peut adresser à cette approche est l'absence d'analyse géotechnique de stabilité des ouvrages et des protections naturelles (digues, dunes...). Il peut en effet paraître superflu de calculer l'inondation à l'aide de modèles complexes et de présenter des cartes d'aléa précises sans savoir si le scénario considéré (digue intacte, digue rompue...) est ou non probable compte tenu de l'évènement centennal choisi. Il serait préférable de mettre en place des critères simples permettant de déterminer s'il peut ou non y avoir rupture/brèche, et de déterminer ensuite la meilleure démarche à adopter. Remarquons en outre qu'il existe aujourd'hui des modèles hydrauliques plus évolués (ex : SURFWB, Marche *et al.*, 2007), permettant de simuler l'inondation en 2D en fonction du temps lorsque le terrain présente de fortes pentes topographiques, comme c'est le cas notamment lorsque l'on a des ouvrages. Ce genre de code permettrait de s'affranchir des erreurs induites par

les modèles à une dimension. Ils sont en revanche plus coûteux en termes de temps de calcul et auraient besoin d'être validés sur plusieurs cas réels.



Figure 17 - Carte d'aléa submersion marine sur la commune de Gâvres (Peeters et al., 2009).

3. Méthodes utilisées à l'étranger

Nous avons vu que la plupart des approches développées en œuvre n'ont été appliquées qu'à des échelles subrégionales, et ne sont pas forcément directement transposables à l'ensemble du littoral français en raison d'hétérogénéités sur la qualité et la quantité de données disponibles (topographie, niveaux marins, etc.). La démarche, consistant à croiser un niveau marin de référence avec la topographie, peut être envisagée pour une étude sur l'ensemble du littoral français, mais présente plusieurs défauts. Elle ne permet pas notamment de tenir compte du caractère non stationnaire de la submersion marine. La hausse du niveau d'eau peut entraîner, par exemple, l'érosion ou le recul d'un front de dune, synonyme de disparition de la ligne de défense et donc d'inondations. L'approche hydro-géomorphologique développée par le CETE-Méditerranée semble donner des résultats cohérents pour le Languedoc-Roussillon mais n'est pas forcément applicable dans le cas de configurations plus complexes du littoral. La méthode développée par DHI est elle plus adaptée pour des études locales. Il nous a donc semblé pertinent d'intégrer dans cette étude quelques exemples de méthode développés à grande échelle dans certains pays étrangers comme les États-Unis, le Royaume-Uni et les Pays-Bas. Nous verrons que les approches adoptées pour traiter de l'aléa submersion marine sont très avancées par rapport à ce qui se fait en France.

Rappelons toutefois qu'il ne s'agit pas ici de mener une étude détaillée de l'ensemble des méthodes élaborées dans ces pays, mais plutôt de présenter de manière synthétique quelques exemples d'approches caractéristiques et d'analyser dans quelle mesure celles-ci sont adaptables au littoral français.

3.1. ÉTATS-UNIS

3.1.1. Contexte

Les modèles de submersion marine ont connu une évolution rapide aux États-Unis suite aux inondations de grande ampleur provoquées par l'ouragan Katrina en 2005. Ceci se traduit, outre l'acquisition de plus en plus systématique de données bathymétriques et topographiques de grande précision (LIDAR), par des modèles statistiques plus élaborés, ou encore la prise en compte des ouvrages de protection lors des calculs d'inondation.

3.1.2. Recommandation de la FEMA

Nous présentons ici quelques recommandations méthodologiques de la FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) pour les études de caractérisation de l'aléa submersion marine pour la côte Atlantique et le littoral bordant le Golfe du Mexique (FEMA, 2007). Les approches proposées s'appuient dans une large mesure sur des méthodes empiriques pour déterminer la résistance des défenses côtières, les taux de

franchissement, les hauteurs d'inondation ou encore les niveaux d'aléa. Un exemple type de méthode proposé par la FEMA est représenté sur la Figure 18.

Évaluation du niveau d'eau centennal à la côte (sans setup)

Le niveau d'eau (marée + surcote atmosphérique) centennal à la côte est déterminé en faisant une analyse statistique sur les données marégraphiques si celles-ci sont suffisamment nombreuses. Il faut s'assurer notamment que les séries temporelles disponibles couvrent une période supérieure à 30 ans. La FEMA préconise d'utiliser la méthode des « blocs maxima » mentionnée plus haut en sélectionnant les maxima annuels et en les ajustant à une distribution GEV (« valeur extrême généralisée ») à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance.

Dans le cas où les données marégraphiques disponibles ne sont pas suffisantes, il est nécessaire de calculer le niveau d'eau à l'aide de modèles numériques à partir de données de tempêtes. La FEMA propose dans un premier temps de créer un grand ensemble d'évènements « synthétiques », dont les caractéristiques (rayon, pression centrale, vitesse de translation, etc.) sont similaires à celles observées. Plusieurs approches sont envisageables, comme la méthode des Probabilités Jointes, l'EST (Scheffner *et al.*, 1999), ou encore la méthode de Monte-Carlo. Dans les études menées actuellement sur le risque submersion marine en Louisiane et au Mississippi, le choix s'est porté sur une version améliorée de la méthode des Probabilités Jointes (JPM-OS, IPET 2008), associée à l'EST (*Empirical Simulation Technique*). Le niveau d'eau à la côte est ensuite déterminé pour chaque tempête synthétique à l'aide d'un code numérique 2D. La FEMA propose d'utiliser l'« *Advanced Circulation Model* » (ADCIRC, FEMA 1988) ou encore le modèle développé par DHI : MIKE-21. Le niveau d'eau centennal est déduit à partir de la probabilité d'occurrence de chacun des évènements.

Les effets de site spécifiques comme les seiches pour lesquels il n'existe pas de données de niveau d'eau et ne pouvant être traités de manière numérique doivent être étudiés au cas par cas en s'appuyant sur des avis d'expert, des modèles analytiques (ex : *Coastal Engineering Manual*, CEM), voir des données historiques.

La FEMA considère par ailleurs qu'il peut être nécessaire d'ajouter à la surcote atmosphérique une hauteur d'eau correspondant à une inondation fluviale lors d'un évènement pluvieux. Elle préconise de faire l'hypothèse que les tempêtes engendrant d'importantes submersions marines ne sont pas les mêmes que celles donnant lieu à des précipitations. Les deux phénomènes sont donc considérés comme indépendants. Il est donc possible de calculer la probabilité de dépasser un certain niveau d'eau Z en sommant les contributions dues à la surcote atmosphérique et aux inondations fluviales, et d'en tirer le niveau d'eau pour une période de retour de 100 ans.

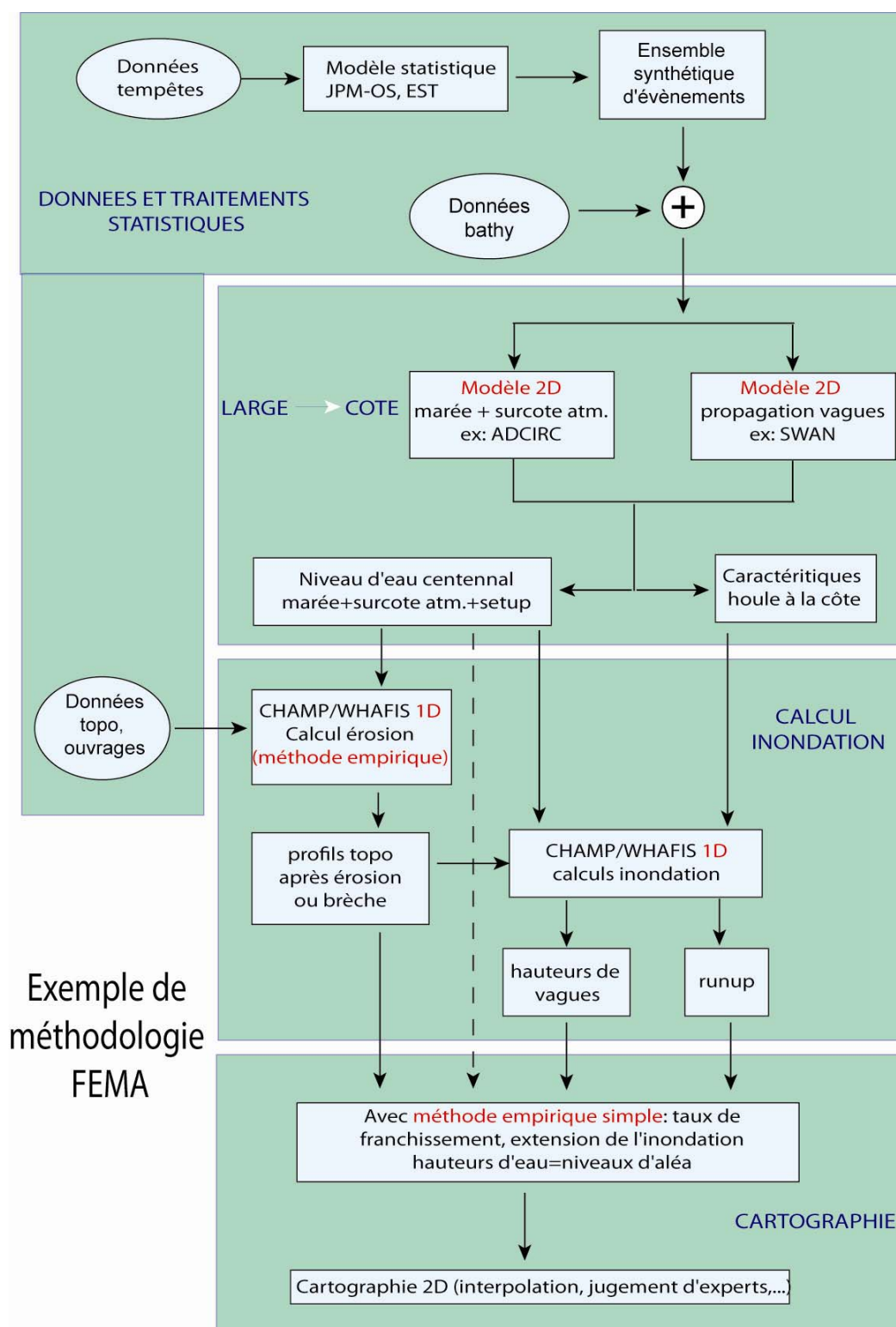


Figure 18 - Exemple de méthode proposée par la FEMA.

Caractéristiques de houle à la côte et calcul du setup

La FEMA remarque que la connaissance précise des conditions de houle n'est pas forcément nécessaire pour le calcul du *setup* et du *run-up*. Ce peut être le cas par exemple pour des eaux peu profondes pour lesquelles la hauteur de vagues est limitée par la bathymétrie et lorsque la contribution du *setup* est faible par rapport à la surcote atmosphérique. Il convient donc de déterminer dans un premier temps si un calcul précis des conditions de houle, au large notamment, est ou non nécessaire. Si ce n'est pas le cas, il existe des formules analytiques (ex : SPM, *Shore Protection Manual*) permettant notamment de calculer la période et la hauteur de vagues en fonction de la distance à un ouragan et de ses paramètres intrinsèques (rayon, pression centrale, vitesse de translation, etc.). Il est donc possible d'estimer ces caractéristiques pour chaque événement synthétique créé pour le calcul de la surcote atmosphérique. Si une connaissance précise des conditions de houle au large paraît nécessaire, celles-ci peuvent être déterminées à l'aide de modèles 2D (ex : WAM, SWAN, STWAVE, REFDIF, modèles DHI) forcés par les données de vent. Ces modèles peuvent éventuellement être couplés à des codes 1D pour simuler la propagation des vagues le long de profils perpendiculaires à la côte afin de limiter les temps de calcul. Le choix s'est porté sur SWAN pour calculer les conditions de houle à la côte dans les études menées actuellement sur la Louisiane et le Mississippi.

La FEMA encourage à calculer le *setup* en fonction de la pente bathymétrique, la hauteur et la cambrure des vagues par la méthode DIM (*Direct Integration Method*), développée lors de la rédaction du « Pacific Coast Guidelines » (FEMA 2004). L'approche décrite dans le « *Shore Protection Manual* » (SPM) semble en effet donner des valeurs trop faibles. La FEMA propose en outre des formules analytiques pour tenir compte de la présence éventuelle d'un ouvrage de protection (avec ou sans franchissement).

Érosion dunaire

La FEMA propose une méthode empirique pour évaluer le profil d'une dune après érosion sous l'effet d'une élévation court-terme du niveau de la mer. Il s'agit dans un premier temps de déterminer le type d'érosion (retrait ou ablation) en fonction du volume de dune se trouvant au dessus du niveau moyen de la mer, sans *setup*. Le profil de plage est ensuite obtenu à partir de considérations géométriques. La FEMA remarque qu'il est préférable de comparer les résultats avec les données historiques dont on dispose pour valider la méthode. Dans le calcul du *run-up*, du taux de franchissement et la propagation des vagues à terre la partie « érodée » dans le profil topographique n'est pas pris en compte.

Calcul des hauteurs de vague et du run-up

Le niveau d'eau centennal (marée + surcote atmosphérique + *setup*) et les caractéristiques de houle déterminés lors des étapes précédentes sont appliqués en entrée de CHAMP (*Coastal Hazards Analysis and Modeling Program*), un modèle s'appuyant sur le code WHAFIS (*Wave Height Analysis for Flood Insurance Studies*, FEMA, 1988) développé par la FEMA pour calculer les hauteurs de vague à terre et le

run-up à 2 % (c'est-à-dire l'altitude dépassée par les vagues 2 % du temps lors d'un événement) le long de profils 1D. Les fondements théoriques de ce modèle proviennent en grande partie de la « *Methodology for Calculating Wave Action Effects Associated with Storm Surges* » de la NAS (*National Academy of Sciences*, 1977). Il permet entre autre de tenir compte -de manière simple- de la végétation ou encore de la présence de bâtiments.

Les résultats de CHAMP/WHAFIS sur les profils 1D peuvent être interpolés pour obtenir une carte des hauteurs de vagues et du *run-up* à 2 %.

Le zonage et la prise en compte des défenses

La FEMA propose de tenir compte des défenses (dunes, ouvrages de protection, etc.) à partir de formules empiriques ou de considérations simples. Nous prendrons ici deux exemples tirés des recommandations du guide méthodologique (FEMA, 2007), celui d'une dune basse et d'une digue :

- Cas de la dune basse :
 - On considère une dune « basse », permettant le passage des vagues.
 - L'extension de l'inondation derrière la dune est définie comme la région pour laquelle la hauteur de vagues est non nulle, et dont l'altitude est inférieure au niveau d'eau centennal (marée + surcote + *setup*).
 - La zone inondée est découpée en un nombre discret de régions, en fonction de la hauteur de vagues. Par exemple, on appellera « zone 1 » celle pour laquelle la hauteur de vague est comprise entre 0,5 et 1,5 pieds (c'est-à-dire entre 15 cm et 45 cm environ).
 - On attribue un niveau d'aléa à chaque zone
- Cas d'une digue :
 - On compare le *run-up* à 2 % avec la hauteur maximale de la digue.
 - Dans le cas où la différence d'altitude ΔH entre le *run-up* et l'altitude maximale est positive (*i.e.* *run-up* > altitude max), la FEMA propose des valeurs de hauteur d'inondation derrière l'ouvrage en fonction de ΔH . La hauteur d'eau derrière de la digue sera par exemple de 1 pied si le *run-up* dépasse l'altitude maximale de l'ouvrage de moins de 1,5 pieds.
 - Dans le cas où le *run-up* calculé est inférieur à l'altitude maximale d'une défense côtière, la FEMA suggère des méthodes empiriques pour déterminer s'il peut y avoir franchissement et le cas échéant pour estimer son taux.
 - Si les résultats indiquent que les taux de franchissement sont suffisamment importants pour menacer la stabilité de la digue, la FEMA propose soit :
 - de mener une étude de stabilité détaillée en s'appuyant sur le rapport de la FEMA du 23 Avril 1990 (voir FEMA, 1990). Le *run-up* et la propagation des vagues à terre seront recalculés sans tenir compte de la structure dans le profil topographique si l'on estime que celle-ci sera entièrement détruite. Des critères simples sont donnés pour déterminer quel profil adopter si la destruction n'est que partielle ;

- de se contenter d'une analyse de stabilité simple, reposant sur le jugement d'expert (voir aussi FEMA, 1990), l'analyse de données historiques, etc. ;
- de refaire les calculs en supposant que la structure est détruite, et de ne garder comme résultat que le plus pénalisant du point de vue de l'aléa.
- Des formules simples permettent ensuite de déterminer les hauteurs d'eau en fonction du taux de franchissement et de la topographie, en faisant une hypothèse sur la durée de l'évènement (typiquement, entre 6 h et 8 h).
- Comme dans le cas de la dune, le niveau d'aléa est décrit en fonction de la hauteur d'eau.

Les résultats obtenus précédemment (pour des profils 1D) sont ensuite extrapolés pour obtenir des cartes à deux dimensions. La FEMA recommande de valider ces résultats par des experts, en s'appuyant notamment sur les données historiques dont on dispose. Des méthodes plus élaborées sont à l'étude, afin de tenir compte notamment d'un « système » de défense, et non plus d'une juxtaposition d'éléments de protection (dunes, digues...) sans interactions.

3.1.3. Remarques

L'approche recommandée par la FEMA combine donc modèles numériques, formules empiriques, critères simples et jugement d'expert pour évaluer l'aléa submersion marine. Elle diffère de la plupart des études menées en France sur deux points essentiels :

- les conditions de houle centennale sur la côte ne sont pas déterminées en propageant la « houle centennale » au large, mais à partir de statistiques sur les houles propagées à la côte par un grand nombre d'évènements (même remarque pour le niveau d'eau) ;
- l'aspect dynamique de la submersion marine est pris en compte, via les calculs d'érosion des dunes par exemple.

Cette méthode nécessite des données topographiques/bathymétriques de bonne qualité pour pouvoir être mise en œuvre. Elle ne peut donc pas être envisagée dans le cadre d'une évaluation de l'aléa sur l'ensemble des côtes françaises. En revanche, elle pourrait être appliquée sur des linéaires assez importants dans la mesure où elle n'implique pas de gros moyens de calcul. Les critiques que l'on peut adresser à cette démarche tiennent essentiellement à l'application de formules empiriques, l'utilisation de profils 1D, et les critères choisis pour caractériser l'inondation.

3.2. ROYAUME-UNI

3.2.1. Contexte

Le Royaume-Uni (*Department for Environment, Food and Rural Affairs*) a développé depuis plusieurs années une méthode à l'échelle nationale très élaborée (projet RASP, « *Risk Assessment for Strategic Planning* »), permettant d'évaluer le risque

d'inondation côtière et fluviale. Celle-ci s'appuie, pour ce qui est des submersions marines, sur une connaissance précise des défenses du littoral, notamment des ouvrages de protection.

3.2.2. La méthode du projet RASP (DEFRA)

Le principe consiste, de manière schématique, à :

- découper le linéaire côtier en une suite continue de « segments » de défense, correspondant à un ouvrage, ou à une protection naturelle (cordon dunaire, etc.). Les segments pour lesquels on ne dispose pas d'informations sont considérés comme des terres-hautes (et devront faire l'objet d'études ultérieures) ;
- rassembler le plus d'information possible sur ces défenses (type, position, dimensions, niveau d'endommagement des ouvrages, etc.) ;
- conduire une analyse statistique de la « charge » (niveau d'eau + hauteur de vagues) appliquée sur ces défenses en cas de submersion marine d'une période de retour de 200 ans ;
- estimer par des lois empiriques la quantité d'eau susceptible de franchir un « segment de défense » en fonction de la charge appliquée ;
- établir des courbes de fragilité traduisant la probabilité de création d'une brèche dans une défense ;
- imaginer un ensemble de scénarios de rupture possibles (présence d'une brèche dans tel ou tel segment de défense) et évaluer leur probabilité à partir des courbes de fragilité et des « charges » appliquées ;
- calculer la hauteur d'eau en aval de la ligne de défense à l'aide d'un modèle hydraulique pour chacun de ces scénarios ;
- calculer la probabilité d'excéder un niveau d'eau en chaque endroit en combinant les résultats des deux étapes précédentes.

Une description plus détaillée des principales étapes de la méthode (analyse statistique de la charge appliquée, calcul des taux de franchissement, courbes de fragilité et obtention des hauteurs d'eau) est donnée dans la suite de ce chapitre. La Figure 19 en donne une représentation schématique.

Analyse statistique de la charge appliquée sur les défenses côtières

Cette analyse s'appuie sur les travaux de Hawkes *et al.* (2002) sur les probabilités jointes. Elle consiste en quatre étapes :

- Il s'agit tout d'abord de rassembler des données de niveau d'eau et de hauteurs de vagues en différents endroits le long des côtes du Royaume-Uni. Ces données sont fournies essentiellement par les marégrammes exploités par le POL (*Proudman Oceanographic Laboratory*) et le modèle de prévision des vagues utilisé par le UKMO (*UK Meteorological Office*). Le linéaire côtier de la Grande-Bretagne est découpé en une quarantaine de sections. Chacune d'entre elles correspond à une

exposition aux vagues ou encore un marnage spécifiques. Les étapes présentées ci-dessous sont appliquées de manière individuelle sur chacune de ces sections ;

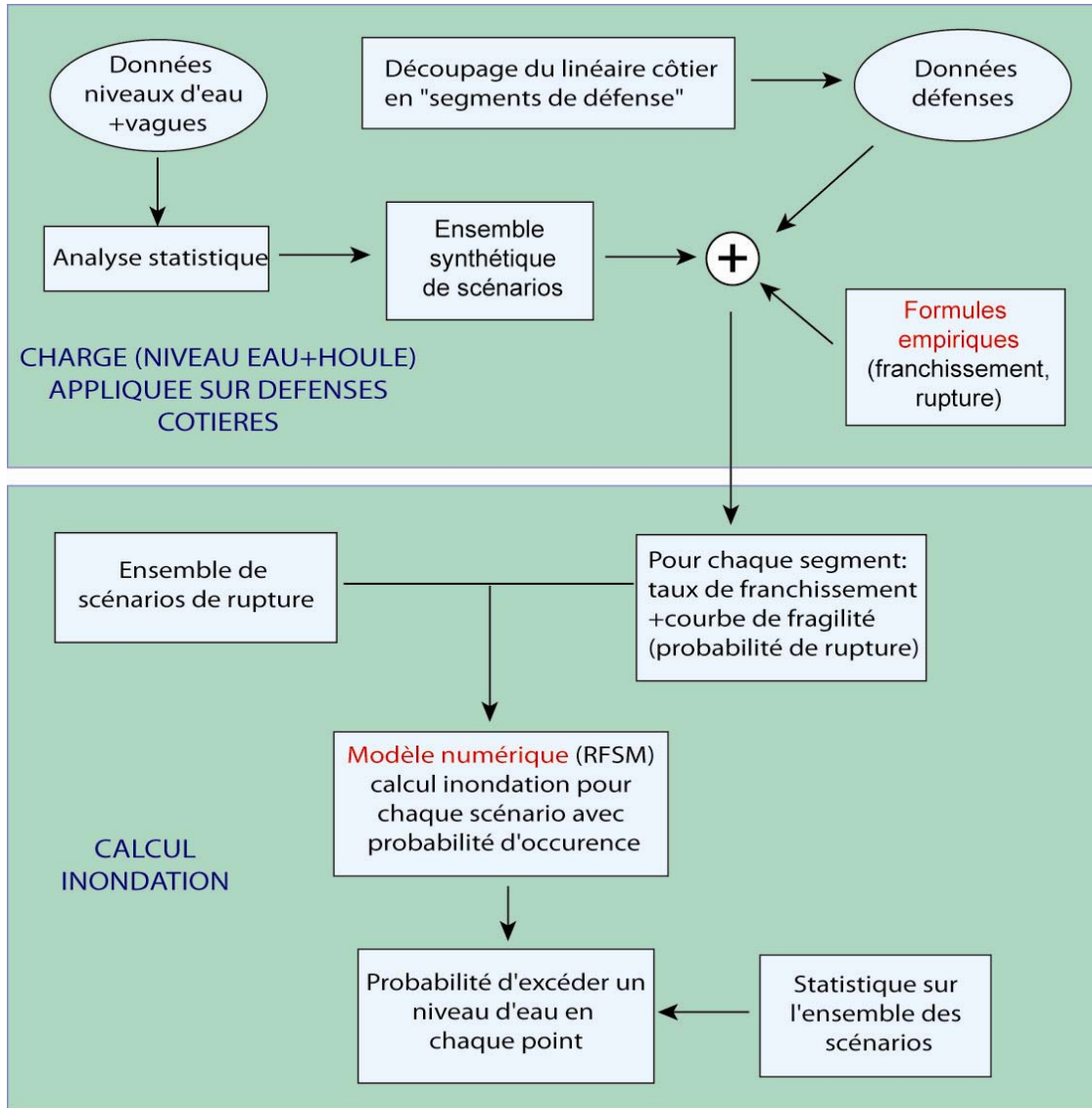


Figure 19 - Représentation schématique de la méthode développée dans le projet RASP.

- les valeurs extrêmes de niveaux d'eau et de hauteurs de vagues collectées lors de l'étape précédente sont représentées par une distribution généralisée de Pareto (pour chaque section) ;
- le degré de dépendance entre les variables (niveaux d'eau et hauteurs de vagues) est déterminé à l'aide d'un modèle statistique faisant intervenir les distributions normales bivariées (HR Wallingford, 2000) ;
- une simulation de Monte-Carlo est ensuite réalisée à partir des résultats des deux étapes précédentes afin d'obtenir un grand échantillon (équivalent à plusieurs milliers d'années) de valeurs synthétiques de niveaux d'eau et de hauteurs de

vagues, présentant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées.

Taux de franchissement et courbes de fragilité

Pour chaque segment de défense et chaque couple de valeurs « niveau d'eau/hauteur de vague » déterminés précédemment, il est possible d'estimer la quantité d'eau en surverse à l'aide de formules empiriques, en fonction du type de structure (plage de galets, digue...) et de ses caractéristiques intrinsèques (pente, hauteur de crête de la digue, etc.). On se référera notamment aux formules proposées par Owen (1980) et EA (1998).

Une analyse statistique des taux de franchissement est ensuite menée en considérant, pour chaque segment de défense, l'ensemble des scénarios obtenus par la simulation de Monte-Carlo.

Les taux de franchissement sont enfin reliés à la probabilité de création d'une brèche dans la défense à l'aide d'une équation « d'état limite », faisant intervenir des paramètres tels que la durée de l'évènement, l'angle de la pente, ou encore un facteur de rugosité (ex : Vrouwenvelder, 2001). La méthode utilisée consiste donc à construire des *courbes de fragilité* pour chaque type de défense qui donnent la probabilité de création d'une brèche en fonction du taux de franchissement. On tient compte des incertitudes sur les paramètres et le modèle en délimitant chaque courbe de fragilité par une limite supérieure et une limite inférieure.

Calcul de la hauteur d'eau

On imagine ensuite un ensemble de scénarios de rupture plausibles (ex : brèche dans le segment 2, rupture des segments 1 et 4, etc.). On évalue leur probabilité d'occurrence à partir des courbes de fragilité et de la charge appliquée sur le système de défense. Puis on détermine pour chaque scénario les volumes d'eau franchissant les défenses à l'aide des résultats précédents. On les injecte dans RFSM (« *Rapid Flood Spreading Model* ») qui est un modèle hydraulique permettant de calculer l'inondation. Ce modèle fonctionne de la manière suivante :

- Génération du « maillage » :
 - le domaine de calcul est déterminé à partir des « Indicative Floodplain Maps » publiées par l'*Environment Agency*. Ces cartes, établies à l'aide de données historiques ou de modèles hydrauliques simples (basés sur le *Flood Studies Report*, 1975, et le *Flood Estimation Handbook*, 1999), donnent un premier aperçu des zones susceptibles d'être inondées en l'absence de défenses pour des submersions marines de période de retour 200 ans. Elles constituent l'emprise maximale de la zone inondée ;
 - on identifie ensuite les « points d'accumulation », c'est-à-dire les dépressions topographiques dans lesquelles l'eau est susceptible de s'accumuler ;
 - chacun de ces points est associé à un ensemble de mailles élémentaires (ou « *Cellules d'Impact* »), appelé « *Zone d'Impact* ». A chaque Zone d'Impact correspondra, à la fin du calcul, une hauteur d'eau ;

- on identifie pour chaque Zone d'Impact les Zones d'Impact voisines, ainsi que la cellule ayant l'élévation (ou « *niveau de communication* ») la plus faible à chaque frontière. On considèrera par la suite que l'eau s'écoulera par cette cellule si la Zone d'Impact contient une « trop grande quantité d'eau » ;
- on attribue à chaque Zone d'Impact une table décrivant la correspondance entre le volume d'eau qu'elle contient et la hauteur d'eau qui lui est associée
- Calcul hydrodynamique :
 - les Zones d'Impact adjacentes aux défenses « submergées » sont activées ;
 - pour chaque Zone d'Impact activée, on compare le volume d'eau entrant (celui que l'on a calculé précédemment) avec une valeur seuil : la « capacité ». Celle-ci représente la quantité de volume que la Zone d'Impact peut contenir ;
 - si le volume d'eau entrant est inférieur à la capacité pour une Zone d'Impact donné, le calcul s'arrête pour celle-ci (l'eau n'inondera pas les Zones d'Impact voisines) ;
 - dans le cas contraire, la Zone d'Impact adjacente ayant le niveau de communication le plus bas est supposée submergée. Elle est donc « activée », et on recommence le calcul en lui imposant le volume d'eau excédentaire (volume d'eau dans la Zone d'Impact « parente » - capacité) ;
 - le calcul s'arrête lorsque toutes les Zones d'Impact « activées » ont été inondées par un volume d'eau inférieur ou égal à leur capacité ;
 - on en déduit une hauteur d'eau pour chaque Zone d'Impact.

Ce modèle, très simple, permet de calculer rapidement un grand nombre de scénarios (de l'ordre de 10 000 par seconde), et donc de tester de nombreuses configurations de comportement des défenses côtières, notamment la présence ou non d'une brèche sur un nombre variable de segments. À l'aide des courbes de fragilité déterminées précédemment, on peut dès lors générer des courbes donnant pour chaque Zone d'Impact la probabilité d'excéder un certain seuil de niveau d'eau en fonction de la charge appliquée (niveau d'eau et hauteur de vagues).

Les résultats de RFSM ont été comparés avec ceux de modèles hydrodynamiques plus évolués (ex : TUFLOW) dans plusieurs cas tests, et paraissent satisfaisants. Les données topographiques sont par ailleurs de bonne qualité (mesures LIDAR) dans la plupart des zones susceptibles de subir des inondations, en particulier dans les milieux urbains.

3.2.3. Remarques

Cette approche va donc beaucoup plus loin que les propositions de la FEMA présentées précédemment, dans la mesure où :

- elle intègre à la fois inondation côtière et inondation fluviale ;
- elle comporte une analyse beaucoup plus poussée sur le comportement des défenses côtières (courbes de fragilité) ;

- le système de défense est considéré dans son ensemble : on teste des « scénarios de rupture » plutôt que de regarder le comportement d'une digue ou d'un cordon dunaire de manière individuelle ;
- plusieurs scénarios de rupture sont envisagés. Les analyses statistiques sont effectuées directement sur les hauteurs d'inondation (plutôt que de déterminer la hauteur d'inondation correspondant à un seul scénario de période de retour donnée) ;
- les hauteurs d'eau et l'extension de l'inondation sont calculées numériquement à l'aide d'un code 2D et non plus à partir de critères simplistes.

Elle peut être considérée, d'un point de vue méthodologique, comme l'état de l'art en ce qui concerne l'évaluation de l'aléa submersion (au même titre que l'approche développée aux Pays-Bas). Une première version de cette démarche a été testée en 2003 sur les côtes françaises (en Languedoc Roussillon plus précisément), dans le cadre du projet européen COASTWATCH. L'objectif était de voir si ce type de méthode pouvait être appliqué à l'échelle européenne. Les résultats de cette étude n'ont pas été concluants. Il s'est avéré que la méthode RASP était difficilement transposable en France, en raison notamment :

- de l'absence d'une base de donnée nationale détaillée sur les caractéristiques des ouvrages de protection ;
- de l'absence de données topographiques de résolution suffisante (inférieure au mètre), en particulier dans les zones basses.

Elle pourrait être envisagée en revanche à une échelle plus locale, dans les régions couvertes par des données LIDAR notamment, pour lesquelles l'on dispose d'informations actualisées détaillées sur les ouvrages de protection.

3.3. PAYS-BAS

3.3.1. Contexte

Les méthodes développées aux Pays-Bas pour obtenir des cartes d'inondation à grande échelle sont assez similaires à celles mises en place au Royaume-Uni. Elles traitent en général les submersions marines et les inondations fluviales de manière intégrée et reposent elles aussi sur une bonne connaissance des défenses côtières et fluviales. Nous présenterons ici les grandes lignes de la méthode développée dans FLORIS (*Flood Risks and Safety in the Netherlands*), un projet de grande ampleur lancé en 2001 à l'initiative du « *Directorate-General for Public Works and Water Management* », afin d'établir des cartes de risque d'inondation pour l'ensemble du territoire.

3.3.2. Description de la méthode du projet FLORIS

Aux Pays-Bas, les terres inondables sont découpées en « *dike ring areas* » (DRA), c'est-à-dire des zones entourées d'une succession de défenses côtières et fluviales

(digues, dunes, structures hydrauliques) et de terres hautes. Ces régions et les critères de sécurité associés sont représentés sur la Figure 20. Un niveau de sécurité de 1/2000 signifie que le système de défense doit être capable de résister à un événement ayant une probabilité 1/2 000 de se produire chaque année. L'aléa est calculé de manière indépendante pour chacune de ces régions.

La méthode adoptée dans FLORIS consiste à concevoir des scénarios de rupture du système de défense et d'évaluer leur probabilité à partir de modèles décrivant le comportement d'une dune ou d'un ouvrage soumis à une élévation du niveau d'eau. Les hauteurs d'eau et les vitesses dans la zone inondée sont ensuite déterminées avec un modèle 2D pour chacun de ses scénarios. En combinant les résultats de l'ensemble des scénarios (et leur probabilité associée), on peut en déduire les valeurs de hauteur d'eau ou de vitesse pour chaque période de retour. Les principales étapes de la méthode adoptée dans FLORIS sont représentées sur la Figure 21.

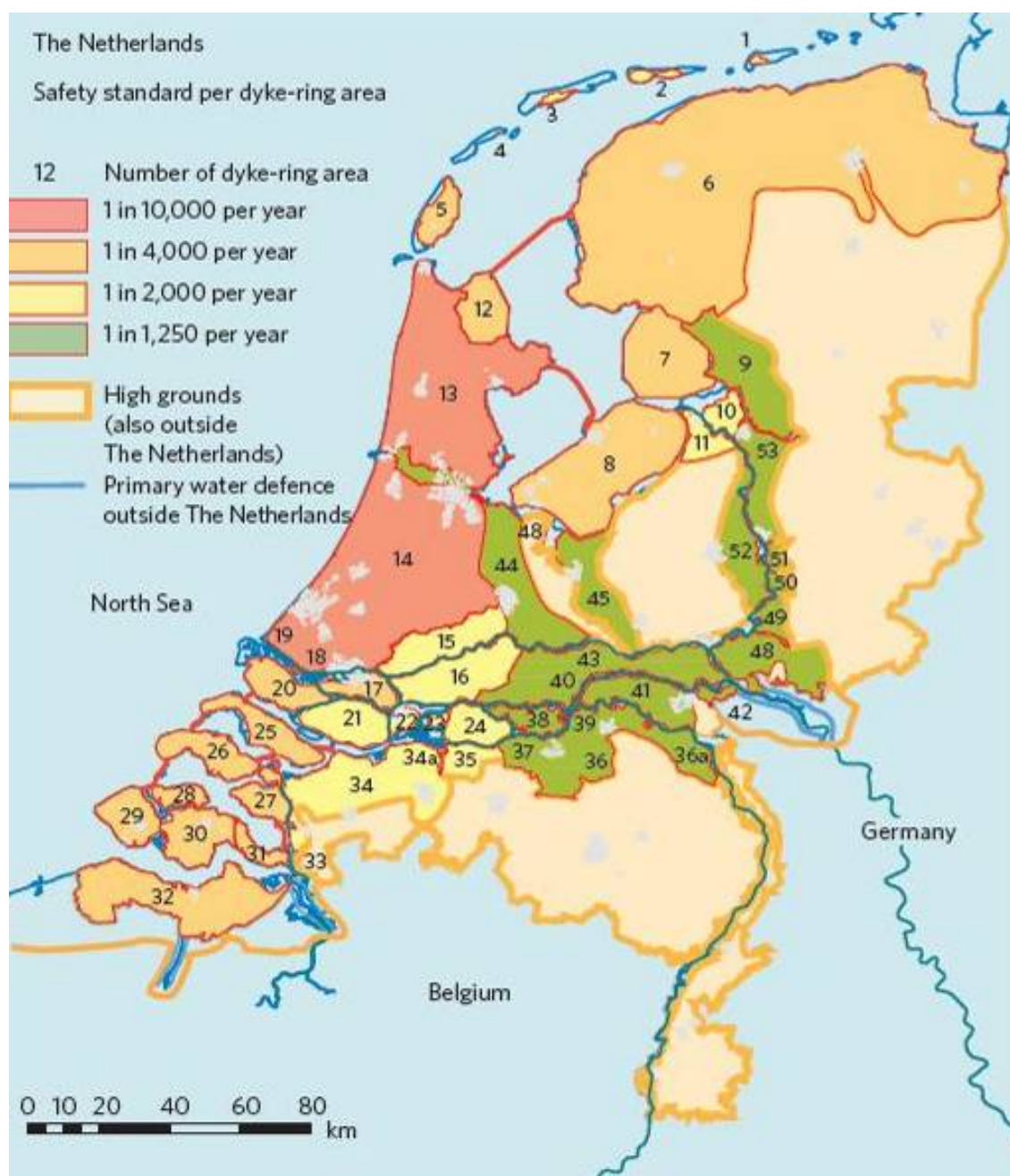


Figure 20 - « Dike ring areas » et niveaux de sécurité associés, exprimés en probabilité d'occurrence par année.

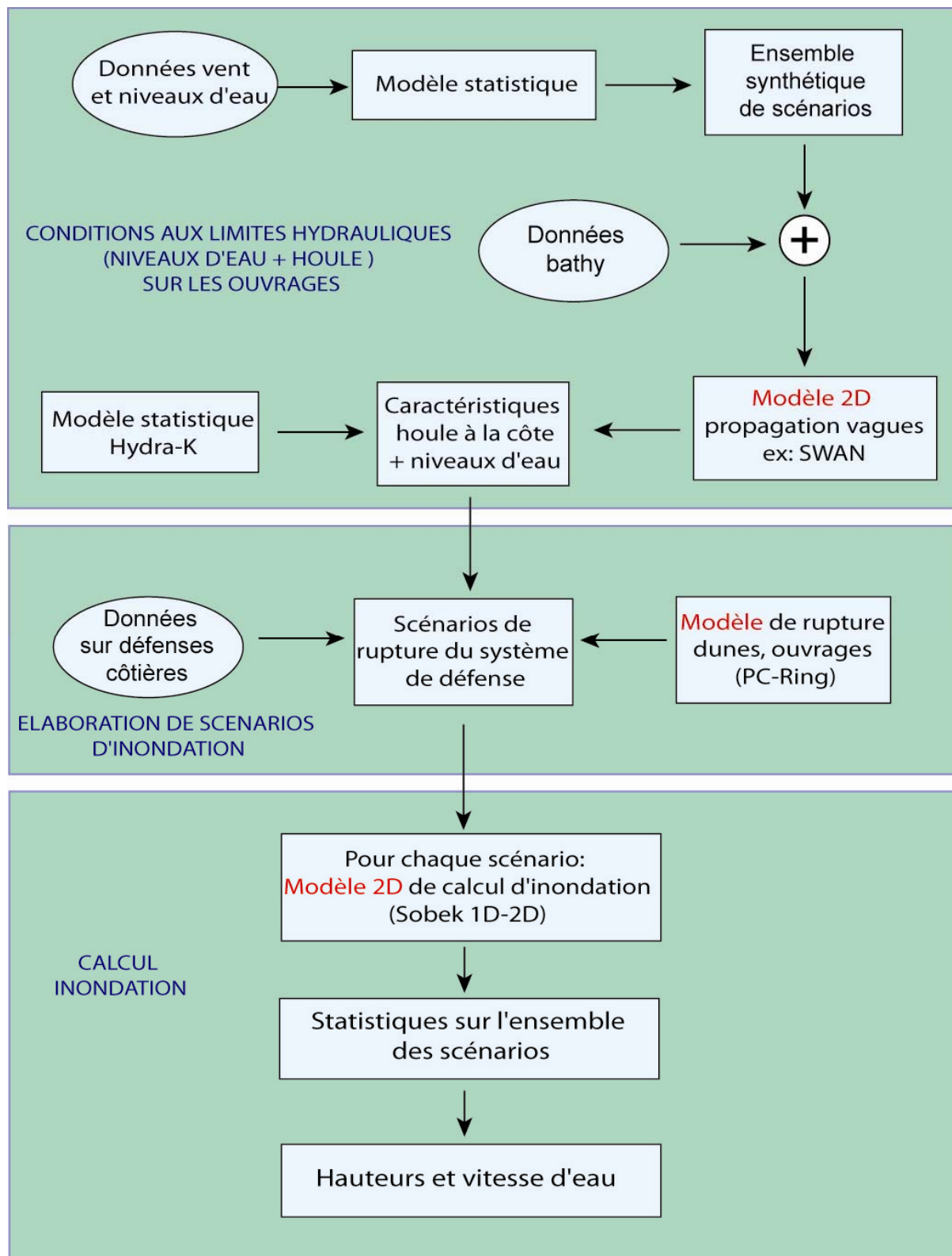


Figure 21 - Principales étapes de la méthode développée dans le projet FLORIS.

Conditions aux limites hydrauliques

Aux Pays-Bas, les « conditions aux limites hydrauliques » (les périodes de retour des niveaux d'eau et des conditions de houle extrêmes sur la côte) sont réévaluées tous les cinq ans. Elles sont déterminées de la façon suivante :

- les conditions de vent au large et les niveaux d'eau extrêmes sont déterminés à partir d'une analyse statistique ;
- cette analyse permet de constituer un ensemble de scénarios synthétiques représentatifs des conditions en mer du Nord lors de conditions extrêmes. Lors de la dernière étude, en 2006, 252 scénarios ont ainsi été considérés (combinaison de six valeurs de vitesse du vent, sept valeurs de direction du vent et six valeurs de niveau d'eau) ;
- pour chacun de ces scénarios on détermine les conditions de houle à la côte à l'aide du modèle SWAN ;
- les périodes de retour sont estimées à l'aide d'Hydra-K, un modèle probabiliste s'appuyant entre autres sur une méthode de Monte-Carlo.

Élaboration de scénarios d'inondation

La première étape consiste à découper la ligne de défense entourant une DRA (*dike ring area*) en une juxtaposition de sections, présentant chacune des caractéristiques uniformes en termes de charge appliquée (niveau d'eau, vagues) et de résistance. Une section peut représenter une dune, une digue, ou encore une structure hydraulique.

On identifie ensuite les sections dont on va tenir compte dans les calculs (les plus vulnérables *a priori*) et les mécanismes par lesquels elles peuvent « céder » (érosion d'une dune, affouillement d'une digue, endommagement de son revêtement, franchissement des vagues par-dessus un ouvrage, etc.). On rassemble ensuite pour chacune de ces sections l'ensemble des données nécessaires à l'étude de vulnérabilité (géométrie, épaisseur d'une éventuelle couche de végétation, coefficients d'érosion du revêtement, etc.).

La probabilité de défaillance d'une ou plusieurs sections de défense (création d'une brèche, franchissement des vagues par-dessus l'ouvrage, etc.) est évaluée à l'aide du logiciel PC-Ring (*TNO Building and Construction Research*) en fonction des données rassemblées lors de l'étape précédente et des conditions aux limites hydrauliques (voir 3.3.2. a).

Un ensemble de scénarios d'inondation (ex : brèche dans la section 1 et franchissement des vagues avec un certain taux dans la section 4) peut donc être élaboré avec leur probabilité associée. On ne considère en général que les plus probables.

Inondation et zonage

Pour chaque scénario considéré, on simule l'inondation à l'aide de Sobek 1D-2D, un modèle hydrodynamique 2D développé par WL/Delft Hydraulics. On obtient les hauteurs et les vitesses d'eau en chaque point dans la zone inondée.

Ensuite on réalise une analyse statistique des résultats sur l'ensemble des scénarios (en tenant compte de leur probabilité d'occurrence). Il est alors possible d'associer en chaque point une période de retour avec une hauteur d'eau et une valeur de vitesse.

3.3.3. Remarques

L'approche adoptée aux Pays-Bas est très similaire, d'un point de vue méthodologique, à celle mise en place par la DEFRA au Royaume-Uni. Elle est plus lourde à mettre en œuvre dans la mesure où les modèles utilisés sont plus complexes. Le modèle d'inondation permet par exemple non seulement de déterminer les hauteurs d'eau mais aussi les vitesses. Remarquons pour conclure la volonté affichée aux Pays-Bas de constamment améliorer la méthode et les outils développés. Les niveaux de sécurité sont par exemple réévalués tous les cinq ans.

4. Propositions de méthodes applicables à l'échelle nationale

4.1. AVANT-PROPOS

L'analyse bibliographique réalisée précédemment montre que les méthodes « alternatives » (c'est-à-dire ne consistant pas à croiser un niveau de référence avec la topographie) sont très rares en France, et ne sont pas vraiment satisfaisantes dans le cadre d'une évaluation préliminaire de l'aléa submersion marine à l'échelle nationale. L'approche hydro-géomorphologique (2.4) développée par le CETE-Méditerranée semble donner par exemple de bons résultats au Languedoc-Roussillon, mais n'est pas forcément applicable à l'ensemble du littoral français. Celle du bureau d'étude DHI (2.5) est plus adaptée pour des études locales. Les méthodes élaborées au Royaume-Uni, aux Pays-Bas et même aux Etats-Unis sont, quant à elles, difficilement transposables en raison du peu d'informations disponibles en France sur les ouvrages de protection et de la précision limitée des données topographiques.

La méthode « classique » semble donc la plus adaptée dans le cadre de notre étude. C'est d'ailleurs l'approche qui a été adoptée dans les seuls travaux recensés appliqués à l'échelle de la métropole : ceux du CETE-CETMEF (§ 2.3).

Nous avons montré qu'il existait de nombreuses façons de mettre en œuvre cette méthode. Cette variété s'explique notamment par l'hétérogénéité des données disponibles sur le littoral français. En termes de calcul du niveau marin, on observe par exemple des disparités entre les études menées sur la façade Manche-Atlantique, la Méditerranée et les Départements d'Outre Mer :

- dans le cas de la façade Manche-Atlantique, la couverture spatiale et temporelle des données marégraphiques permet d'envisager des études statistiques sur les niveaux extrêmes. Les caractéristiques de houle peuvent être déduites à partir de modèles globaux comme WaveWatch 3 ou TOMAWAC ce qui permettrait de déterminer le *setup* par exemple ;
- en Méditerranée, les informations dont on dispose sur les niveaux d'eau sont plus limitées. Le niveau centennal de référence est donc souvent postulé à partir de données historiques (ex : Guide Méthodologique PPR-SM Languedoc-Roussillon). Il existe par ailleurs peu de données sur les caractéristiques de houle ;
- le cas des Départements d'Outre-Mer est différent dans la mesure où les surcotes proviennent souvent d'événements cycloniques. Le traitement statistique des niveaux d'eau n'est donc pas le même a priori que ceux mis en place en France métropolitaine. En outre, les caractéristiques de houle cycloniques ne peuvent pas être déduites à partir de modèles globaux comme WaveWatch 3 en raison de leur manque de résolution spatiale et temporelle. De surcroît, les houles ont tendance à contourner les îles, ce qui ne permet pas toujours d'appliquer les formules empiriques couramment utilisées en métropole. Le peu de données disponibles sur

certaines façades incite donc souvent à établir un niveau de référence à partir de données historiques ou d'avis d'expert.

Ces disparités sont encore plus flagrantes pour la topographie. La disponibilité de données LIDAR sur certains littoraux (ex : Mayotte, la Réunion, voir la région Nord-Pas-de-Calais) permet ainsi d'envisager des études locales très fines, alors que dans le cas où seules les données de la BD Topo de l'IGN sont disponibles, seule une approche « premier ordre » peut être appliquée (Guide méthodologie PPR-SM Languedoc-Roussillon, PPR Saint-François-Guadeloupe). Ceci pose problème pour l'établissement d'une méthode à l'échelle nationale, puisque cela suppose de travailler avec le « *plus petit dénominateur commun* » en termes de données.

Ces constats nous amènent à tirer les conclusions suivantes pour une évaluation préliminaire de l'aléa submersion marine à l'échelle nationale:

- il semble raisonnable d'adopter la méthode consistant à croiser un niveau marin de référence avec la topographie ;
- il est préférable de distinguer Départements d'Outre-Mer et France Métropolitaine dans les études d'aléa plutôt que de proposer une approche parfaitement homogène. Par ailleurs, il peut être judicieux de dissocier façade Manche-Atlantique et Méditerranée pour les calculs de niveau d'eau ;
- l'application d'une méthode « homogène » suppose l'utilisation des données topographiques de l'IGN de précision métrique. Il semble donc superflu dans un premier temps de déterminer les niveaux extrêmes à l'aide de calculs statistiques très poussés, ou de mener des études de stabilité des systèmes de défense côtiers (naturels ou artificiels) complexes. La caractérisation de l'aléa à partir de hauteurs d'inondation n'est par ailleurs pas envisageable compte tenu des incertitudes sur les altitudes ;
- les données disponibles sur les ouvrages de protection ne permettent d'ailleurs pas d'en tenir compte dans une étude à l'échelle nationale autrement que par avis d'expert.

En conséquence, nous proposons trois approches pour l'évaluation et la caractérisation de l'aléa (deux pour la France Métropolitaine, et une pour les Départements d'Outre-Mer), qui reposent sur le principe méthodologique couramment adopté de croisement d'un niveau de référence avec la topographie :

- une approche très simplifiée pour la France métropolitaine, qui reprend pour l'essentiel la méthode CETE-CETMEF et peut donc être mise en œuvre dans des délais relativement brefs ;
- une approche plus complète permettant de tenir compte des variations du *setup* le long du littoral, et parallèlement l'utilisation de données topographiques plus fines ;
- une approche simplifiée pour les Départements d'Outre-Mer, applicable dans tous les cas malgré de fortes hétérogénéités sur les données disponibles en termes de niveaux d'eau et de topographie.

Nous proposerons par ailleurs, en conclusion de ce rapport, quelques pistes méthodologiques envisageables pour les années à venir.

4.2. FRANCE MÉTROPOLITAINE : MÉTHODE SIMPLE

4.2.1. Présentation de la méthode

L'approche proposée par le CETE-CETMEF (cf. 2.3) présente, nous l'avons vu, plusieurs avantages. Elle permet en effet de cartographier simplement les zones basses potentiellement soumises à l'aléa submersion marine à partir de données préexistantes, comme les niveaux marins du SHOM et les données altimétriques de l'IGN. Elle comporte toutefois quelques défauts :

- les niveaux du SHOM ne tiennent pas compte (ou très peu) de la surcote générée par les vagues. On sous-estime donc systématiquement les niveaux d'eau de plusieurs dizaines de centimètres. Nous avons vu que dans certains cas la différence pouvait atteindre voire dépasser 1 m (voir 2.3) ;
- le niveau de référence proposé pour la Méditerranée (+ 1,5 m NGF) est probablement trop faible. Des niveaux d'eau de + 2 m NGF ont ainsi été observés lors des 15 dernières années, par exemple lors de la tempête de 1999 (Anselme *et al.*, 2008) ;
- les données historiques ne sont pas prises en compte dans l'évaluation de l'aléa. Or ce sont les seules informations disponibles pour valider les évaluations ;
- elle conduit à des incohérences dans certains cas de figure, notamment pour des zones à faible altitude en arrière de défenses côtières infranchissables (et qui seront qualifiées à tort de zones inondables par submersion marine) ou pour des zones très éloignées du littoral sur lesquelles on ne peut plus parler de submersion marine.

Nous proposons donc une version améliorée de cette approche permettant d'évaluer l'aléa de manière plus réaliste tout en conservant une certaine simplicité dans la mise en œuvre (Figure 22). La démarche est la même que celle du CETE-CETMEF, à l'exception des points présentés dans les paragraphes suivants.

Prise en compte forfaitaire du setup

Afin de tenir compte du setup, les niveaux d'eau sur la façade Manche-Atlantique sont rehaussés de 1m. Ceci permet de ne plus sous-estimer le niveau extrême de manière systématique comme souligné précédemment. Cette valeur a été choisie car les études locales ont montrées que la surcote générée par la houle pouvait atteindre ces valeurs (ex : Cariolet et Suanez, 2009). De plus, cette valeur n'est pas irréaliste même dans les cas où le setup est à l'évidence plus faible, car d'autres mécanismes comme le run-up peuvent contribuer à l'altitude maximale atteinte par l'eau. Le niveau extrême ainsi défini permet d'obtenir une « emprise maximale » de l'aléa inondation. Une caractérisation adaptée de l'aléa (à dire d'expert par exemple, voir ci-dessous) permettra de nuancer les résultats obtenus dans le cas où l'extension prédite est à l'évidence trop importante. Enfin, prendre une valeur plus faible (par exemple 60 cm)

ne changerait rien au résultat final dans la mesure où la résolution des données altimétriques utilisée reste de 1 m.

Méthodologie simplifiée France métropolitaine

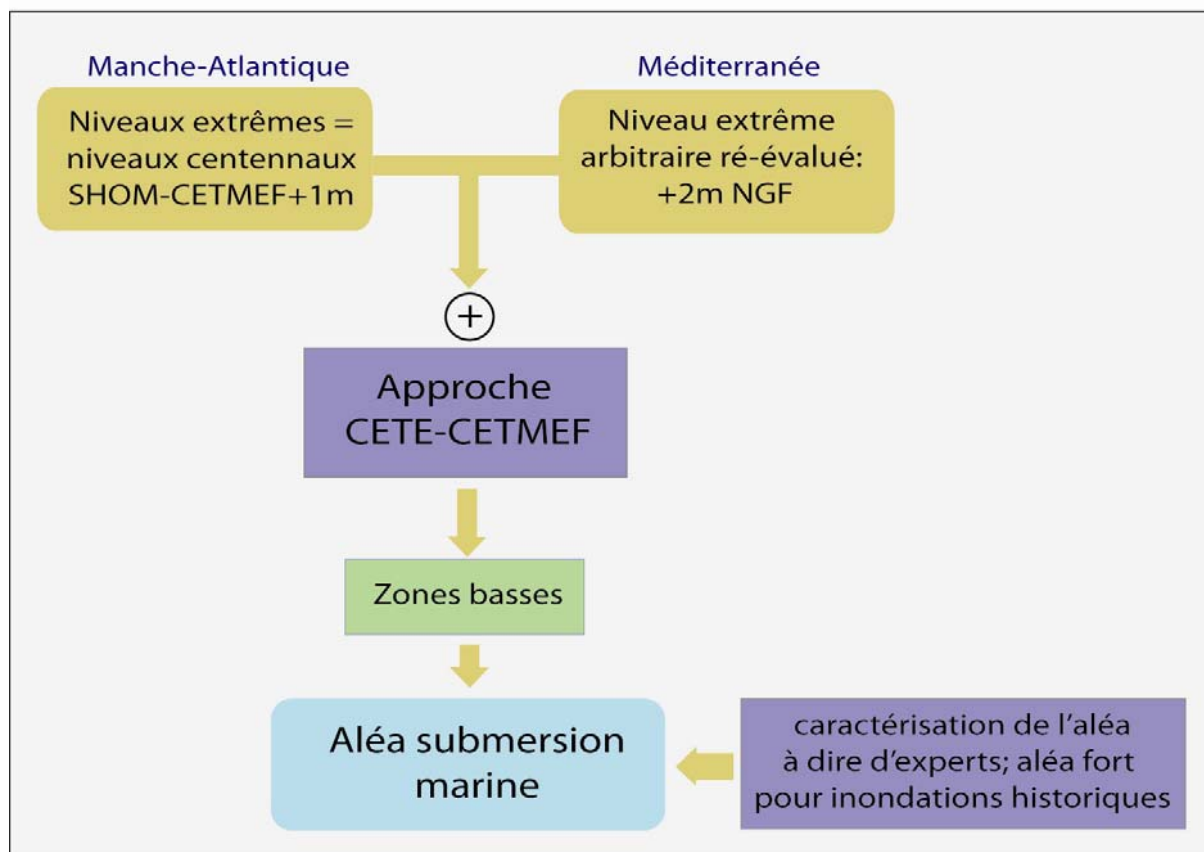


Figure 22 - Représentation schématique de la méthode simplifiée proposée pour la métropole.

Niveau de référence en Méditerranée

Le niveau de référence en Méditerranée est pris égal à + 2 m NGF et non + 1,5 m NGF. Cette valeur correspond, comme nous l'avons indiqué précédemment, à des altitudes d'inondations déjà observées,

Caractérisation de l'aléa

La caractérisation de l'aléa est effectuée par avis d'experts. Deux niveaux d'expertise pourraient être envisagés. L'homogénéité sur l'ensemble du littoral serait assurée par exemple par un collège d'experts à l'échelon national, qui s'appuierait sur les compétences d'experts en région. Un aléa fort pourrait être attribué aux zones inondées dans le passé. Il pourrait être qualifié de moyen dans le cas contraire, sauf si certains critères sont remplis indiquant que l'aléa submersion marine est faible voir nul

(par exemple en arrière d'un cordon dunaire de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, dont l'altitude maximale est supérieure de 2 m au niveau de référence, et en l'absence de zone plus basses et plus fragile dans un rayon de plusieurs kilomètres).

4.2.2. Avantages

Cette démarche reste donc relativement simple à mettre en œuvre et améliore l'approche du CETE-CETMEF :

- les niveaux d'eau extrêmes ne sont plus systématiquement sous-estimés, aussi bien sur la façade Manche-Atlantique que sur la Méditerranée ;
- la caractérisation de l'aléa par dire d'experts permet d'affiner l'enveloppe « zones basses » pour s'approcher d'une enveloppe d'aléa submersion marine.

4.2.3. Inconvénients

Cette approche simplifiée présente quelques inconvénients. En effet, le *setup* peut varier de manière importante (jusqu'à 1 m environ) le long du littoral sur de courtes distances (quelques kilomètres par exemple). Ceci implique que le découpage du littoral en « segments » de niveaux d'eau homogènes sur plusieurs centaines de kilomètres n'est probablement pas assez fin. Par ailleurs, prendre une valeur de 1 m pour le *setup* sur la façade Manche-Atlantique ne peut être considéré que comme une démarche « maximisante » en termes de niveaux d'eau. Une approche plus fine permettrait de tenir compte des variations le long de la côte, et donc de proposer des niveaux d'eau plus réalistes dans certains cas. Enfin, les données altimétriques de l'IGN à 1m de résolution verticale sont mal adaptées à la problématique de la submersion marine. En effet, l'effet de seuil généré par cette résolution verticale peut avoir, dans les zones très plates, un impact énorme sur l'extension de l'inondation (en Languedoc-Roussillon par exemple).

4.3. DÉPARTEMENTS D'OUTRE-MER : MÉTHODE SIMPLE

Nous avons vu que le cas des Départements d'Outre-Mer était plus complexe et devait être traité de manière séparée. En effet :

- les surcotes sont dues essentiellement à des événements spécifiques (cyclones, dépressions tropicales), qui impliquent un traitement statistique différent ;
- les caractéristiques de houle cyclonique ne peuvent pas être déduites à partir de modèles globaux comme WaveWatch 3 en raison de leur manque de résolution spatiale et temporelle ;
- les houles ayant tendance à contourner les îles, il n'est pas toujours possible de calculer le *setup* et le *run-up* à partir des formules empiriques couramment utilisées pour des études en métropole.

Il nous a donc semblé plus satisfaisant de proposer une approche distincte pour les DOM. L'élaboration d'une méthode homogène pour les Départements d'Outre-Mer n'est d'ailleurs pas évidente en soi dans la mesure où chaque DOM présente des caractéristiques bien distinctes en termes d'origine des surcotes ou encore de données disponibles. La Réunion se distingue par exemple dans la mesure où elle est soumise non seulement aux cyclones mais aussi aux houles australes. Elle dispose en outre (tout comme Mayotte) de données LIDAR sur l'ensemble de son littoral. A l'inverse, seules des données de précision métrique sont disponibles actuellement en Guadeloupe, en Martinique et en Guyane. Les études Météo France réalisées aux Antilles et dans l'océan Indien donnent un bon ordre de grandeur de la surcote atmosphérique cyclonique centennale en Martinique, en Guadeloupe, à Mayotte et à la Réunion. En revanche, il n'existe pas à notre connaissance d'étude statistique sur la surcote atmosphérique en Guyane. Dans les études PPR, les niveaux extrêmes y sont évalués essentiellement à partir des niveaux historiques.

4.3.1. Présentation de la méthode

Compte tenu des hétérogénéités présentées plus haut, nous proposons une approche simple reposant essentiellement sur les données historiques et des avis d'experts. La démarche est la suivante :

- détermination de l'altitude maximale atteinte par l'eau lors des principaux événements passés. Cette valeur sera qualifiée de « niveau historique extrême » ;
- calcul d'un niveau extrême « théorique » par dire d'expert de la manière suivante :
 - on considère le niveau de pleine mer des plus grandes marées de vives-eaux,
 - on lui ajoute une valeur de surcote atmosphérique estimée par dire d'experts à partir des données existantes. Pour la Guadeloupe par exemple, on prendra la valeur de surcote centennale maximale donnée dans le rapport de Météo France sur les surcotes cycloniques aux Antilles. On se contentera de prendre le niveau maximal mesuré par les marégraphes en cas d'absence complète de données,
 - on évalue le *setup* de manière équivalente. On pourra s'aider par exemple des valeurs estimées dans les études PPR existantes, calculer un ordre de grandeur à partir de formules empiriques, d'un profil de plage « type » et des hauteurs maximales de houle au large si celles-ci sont connues (cf. études Météo France sur les houles cycloniques aux Antilles, étude BRGM à la Réunion, etc.) ;
- le niveau extrême de référence est le niveau maximal obtenu (« historique » ou « théorique ») ;
- ce niveau est croisé avec les meilleures données topographiques disponibles (LIDAR à la Réunion, IGN en Guadeloupe, etc.) ;
- la caractérisation de l'aléa est faite à dire d'expert. On considérera par exemple que les zones inondées dans le passé correspondent à un aléa fort, ou encore que les zones de mangroves sont associées avec un aléa faible.

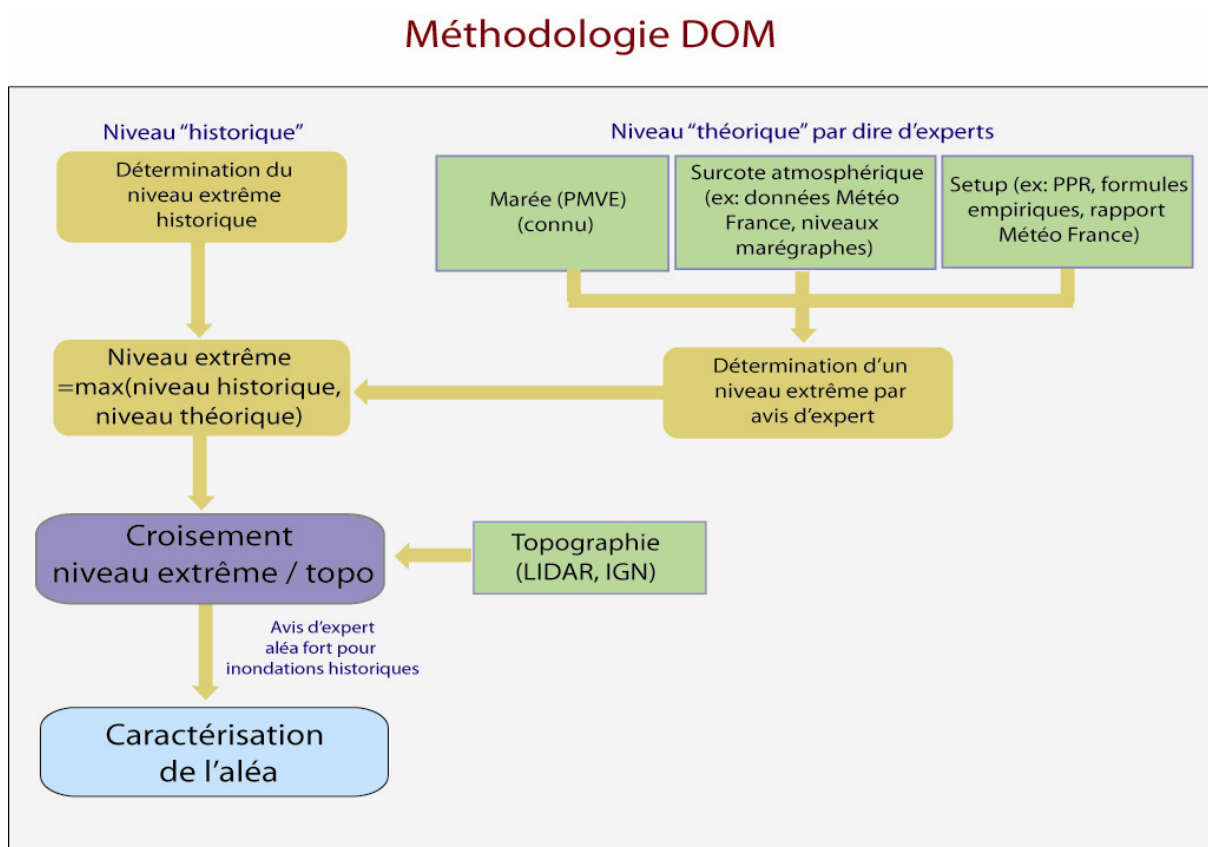


Figure 23 - Représentation schématique de la méthode proposée pour les DOM.

4.3.2. Avantages

Cette approche permet de cartographier l'aléa de manière simple, puisqu'elle repose essentiellement sur des jugements d'experts, et ne nécessite ni calculs complexes ni acquisition de données complémentaires.

4.3.3. Inconvénients

Il n'est pas possible avec cette méthode de cartographier l'aléa de manière tout à fait homogène sur l'ensemble des Départements d'Outre-Mer. En effet, l'hétérogénéité des données disponibles et les caractéristiques propres à chaque département ne permettent pas de caractériser l'aléa avec le même degré de précision dans tous les cas. S'il nous semble difficile d'envisager une solution autre que le jugement d'expert dans le cas d'une évaluation préliminaire, il sera peut être préférable de mettre en place par la suite des méthodes propres à chaque Département d'Outre-mer pour tenir compte de leurs spécificités.

4.4. MÉTHODE DÉTAILLÉE

4.4.1. Présentation de la méthode

Compte tenu des limitations des méthodes simples présentées précédemment, nous proposons une méthode plus détaillée qui, bien qu'un peu plus lourde à mettre en œuvre, permettra de corriger certaines imprécisions dans le calcul de l'emprise de l'aléa. Dans cette méthode, les variations du *setup* le long des côtes seraient intégrées tandis que les données altimétriques seraient retraitées à partir des données IGN de manière à obtenir des MNT plus réalistes. Le calcul du *setup* et du niveau extrême s'appuie sur un découpage du linéaire selon des critères morphologiques, géologiques ou encore d'exposition à la houle (Figure 24).

Le calcul des niveaux extrêmes et la prise en compte du setup

Plusieurs phases successives sont nécessaires pour le calcul du *setup* :

- découpage du linéaire côtier en segments homogènes de plusieurs kilomètres de long selon des critères morphologiques, géologiques et d'exposition à la surcote. Les critères morphologiques seront établis à partir de profils topographiques et bathymétriques existants (thèses, publications, suivis de profils, données SHOM et IGN...). Les critères géologiques, quant à eux, intégreront la lithologie des dépôts littoraux et la nature du substratum. Enfin, l'exposition à la surcote sera évaluée en s'aidant notamment de données historiques sur les inondations ;
- attribution à chaque segment d'un profil bathymétrique-topographique type (en se basant sur l'étude morphologique menée lors du découpage) ;
- détermination pour chaque segment le niveau extrême dû à la marée et à la surcote atmosphérique. Pour la façade Manche-Atlantique, on pourra utiliser comme précédemment les données du SHOM-CETMEF pour représenter le niveau extrême. On prendra la valeur maximale obtenue sur le segment. En Méditerranée, on pourra s'appuyer sur l'expérience du SHOM pour déterminer la meilleure démarche à adopter. Une solution envisageable serait par exemple d'extrapoler les niveaux centennaux calculés par Pirazzoli et Tomasin (2008) pour neuf marégraphes répartis sur le Languedoc-Roussillon, la région PACA, et la Corse ;
- détermination du *setup* pour chaque segment (Figure 25). On calculera des séries temporelles donnant les caractéristiques de houle (hauteur significative, période) en fonction du temps en plusieurs points au large. Plusieurs options sont envisageables :
 - pour la façade Manche-Atlantique, on peut utiliser les sorties du modèle global de houle WaveWatch 3, opéré par la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), qui donne les états de mer depuis 1997. On peut aussi exploiter les résultats de la base de données ANEMOC (*Atlas Numérique d'États de Mer Océanique et Côtier, collaboration EDF R&D LNHE-CETMEF*) qui couvrent une période plus importante (plus de 20 ans) ;
 - pour la Méditerranée, les seules données existantes sont celles d'HIPOCAS (*Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe*). Elles

ont toutefois tendance à sous-estimer très largement les hauteurs de vagues (nous l'avons vérifié en comparant les données du modèle avec celles de la bouée de Sète entre 1988 et 2001). Une solution alternative pourrait consister à recalculer des séries temporelles de houle au large en forçant un modèle de vague tel que SWAN (d'accès libre) par les données de vent NCEP. Les tests que nous avons réalisés (en Languedoc-Roussillon et en Corse) donnent des résultats encourageants.

En chacun de ces points, les caractéristiques de la houle centennale (au large) seront calculées à l'aide d'une analyse statistique d'extrême, consistant à identifier les événements extrêmes à partir des séries temporelles par la méthode POT (Peaks-Over-Threshold) ou des Blocks maxima. Ensuite, il faudra ajuster les données filtrées sur une loi statistique de type Gumbel ou GEV (Generalized Extreme Value). Enfin, il sera nécessaire d'estimer la qualité de l'ajustement par des tests statistiques (ex : maximum de vraisemblance).

Les conditions de houle au large sont ensuite propagées à la côte à l'aide d'un code numérique (ex : SWAN). Les grilles bathymétriques peuvent être générées à partir des données bathymétriques de la base de données Histolitt (SHOM-IGN) ;

Enfin, un modèle numérique (SWAN par exemple) sera utilisé pour calculer le setup pour chaque segment à partir des profils bathymétrique-topographiques obtenus lors de l'analyse morphologique et des conditions de houle à la côte ;

MNT

Afin d'affiner la cartographie de l'aléa, une topographie plus réaliste est nécessaire. Plusieurs possibilités existent pour résoudre ce problème, la première serait de ré-interpoler les données topographiques de l'IGN afin de créer un MNT plus réaliste notamment dans les zones basses. Des essais de traitements des faibles altitudes en Languedoc Roussillon ont été effectués dans le cadre du projet MISEEVA et semble donner des résultats relativement satisfaisant (voir Figure 27). La seconde solution serait de se procurer les données altimétriques INTERMAP (Intermap Technologies-GEOSYS) qui possèdent une maille de 5m de résolution et une précision bien meilleure que celle du MNT IGN ($RMSE [Intermap] \approx 50 \text{ cm}$, $RMSE [IGN] \approx 2,5 \text{ m}$, avec $RMSE = \text{racine carrée de l'écart quadratique moyen}$). L'achat de ces données a bien sur un coût mais celui-ci reste plus faible que celui de l'acquisition LIDAR. Par ailleurs la résolution de 5m semble assez bien adaptée à des études d'échelle régionale.

Croisement niveaux extrêmes et topographie

L'évaluation des surfaces inondable serait réalisée par croisement des niveaux extrêmes calculés (incluant marée, surcote atmosphérique et setup) avec la topographie.

Caractérisation de aléa

Les classes d'aléa seront déterminées par avis d'expert, en considérant que l'aléa est fort dans les zones inondées dans le passé.

4.4.2. Avantages

Cette démarche devrait donner des résultats plus réalistes que la méthode simplifiée (cf. 4.2) dans la mesure où, d'une part, elle tient compte de la variabilité du *setup* le long de la côte et d'autre part elle propose un découpage plus pertinent du littoral, basé sur des critères morphologiques et d'exposition à la houle. Enfin, elle s'applique sur des données topographiques plus fines et plus précises.

4.4.3. Inconvénients

Cette approche est plus lourde à mettre en œuvre que la méthode simplifiée. Si le traitement topographique ne pose pas de problème particulier, la détermination des conditions de houle en Méditerranée et surtout le découpage du littoral en segments morphologiques homogènes sont plus délicats. Ce dernier implique notamment le recours à des avis d'experts et des études bibliographiques (thèses, articles, etc.) afin de rassembler l'ensemble des informations nécessaires.

Cette méthode pourrait être améliorée par ailleurs du point de vue du traitement statistique. En effet, la combinaison d'un *setup* centennal avec un niveau d'eau centennal incluant la marée et la surcote atmosphérique donne un événement de référence dont la période de retour est supérieure à 100 ans. Il serait plus satisfaisant de repartir des données de base (les séries temporelles) et d'effectuer une analyse statistique croisée des états de houle au large et des niveaux extrêmes mesurés par les marégraphes. L'approche suggérée par le bureau d'études DHI (voir 2.5) pourrait être envisageable.

Les surcotes mesurées par les marégraphes peuvent contenir par ailleurs une petite partie de la composante *setup*, qu'il serait préférable d'extraire au préalable. Cette opération n'est malheureusement pas simple à mettre en pratique. Les valeurs de surcote atmosphérique à la côte obtenues par interpolation des niveaux extrêmes au niveau des marégraphes sont en outre contestables, dans la mesure où elles ne tiennent pas compte de la configuration locale du littoral.

Remarquons une fois de plus qu'il existe des méthodes beaucoup plus élaborées dans certains pays étrangers comme les Pays-Bas, le Royaume-Uni, ou encore les États-Unis, qui permettent de tenir compte des défenses côtières de manière plus réalistes. De plus, les approches statistiques utilisées sont plus satisfaisantes et impliquent non pas un unique événement de période de retour donnée, mais un grand ensemble de scénarios.

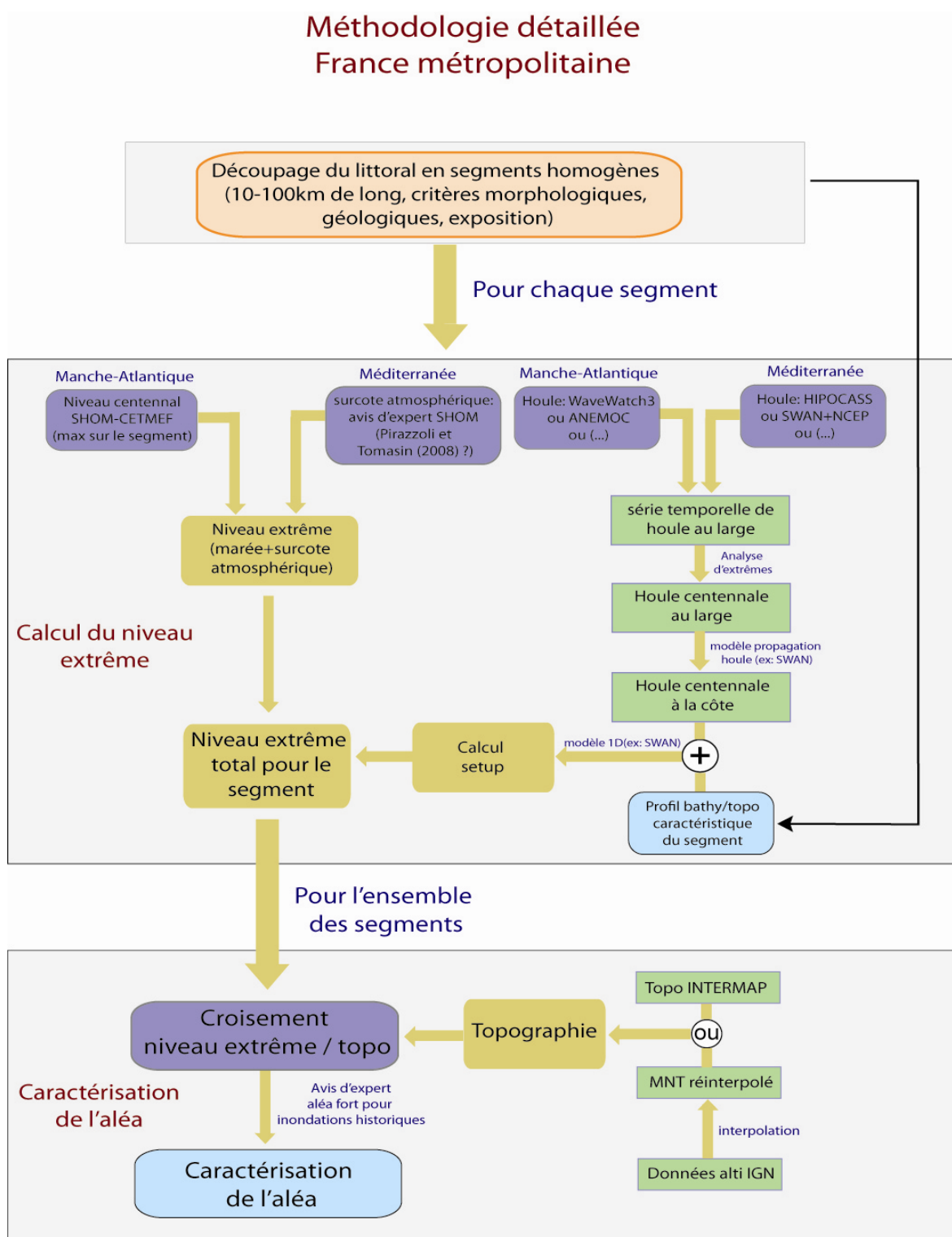


Figure 24 - Représentation schématique de la méthode détaillée proposée pour la métropole.

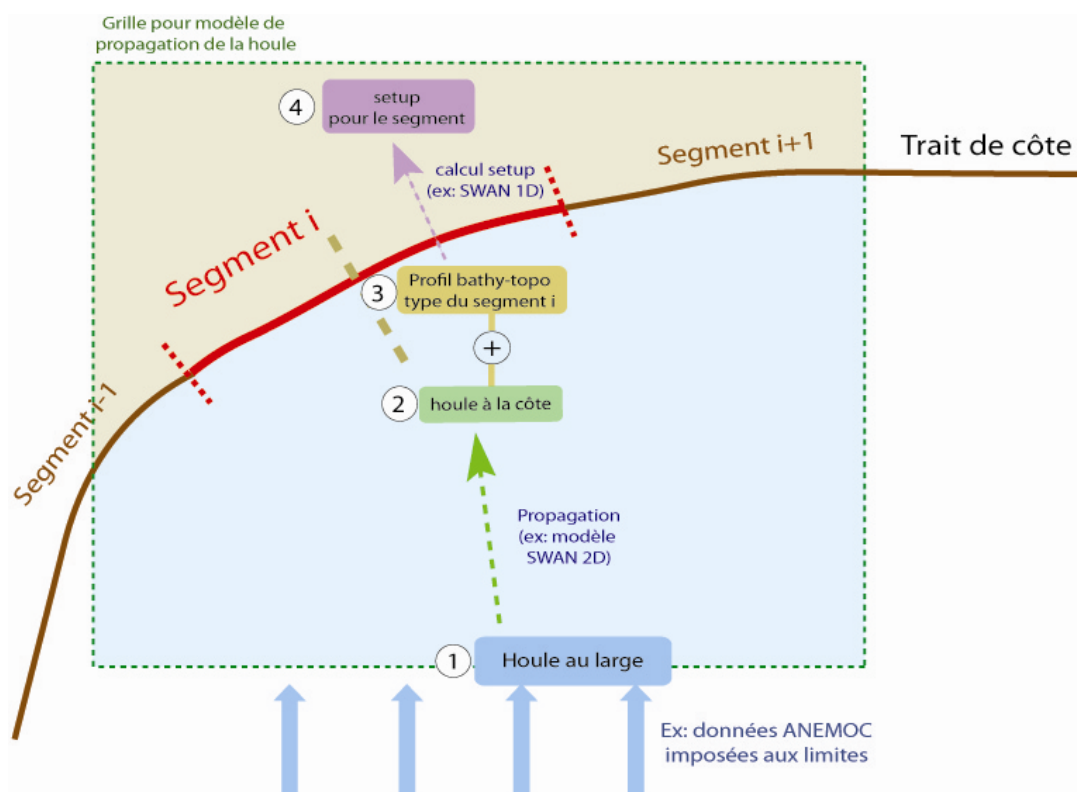
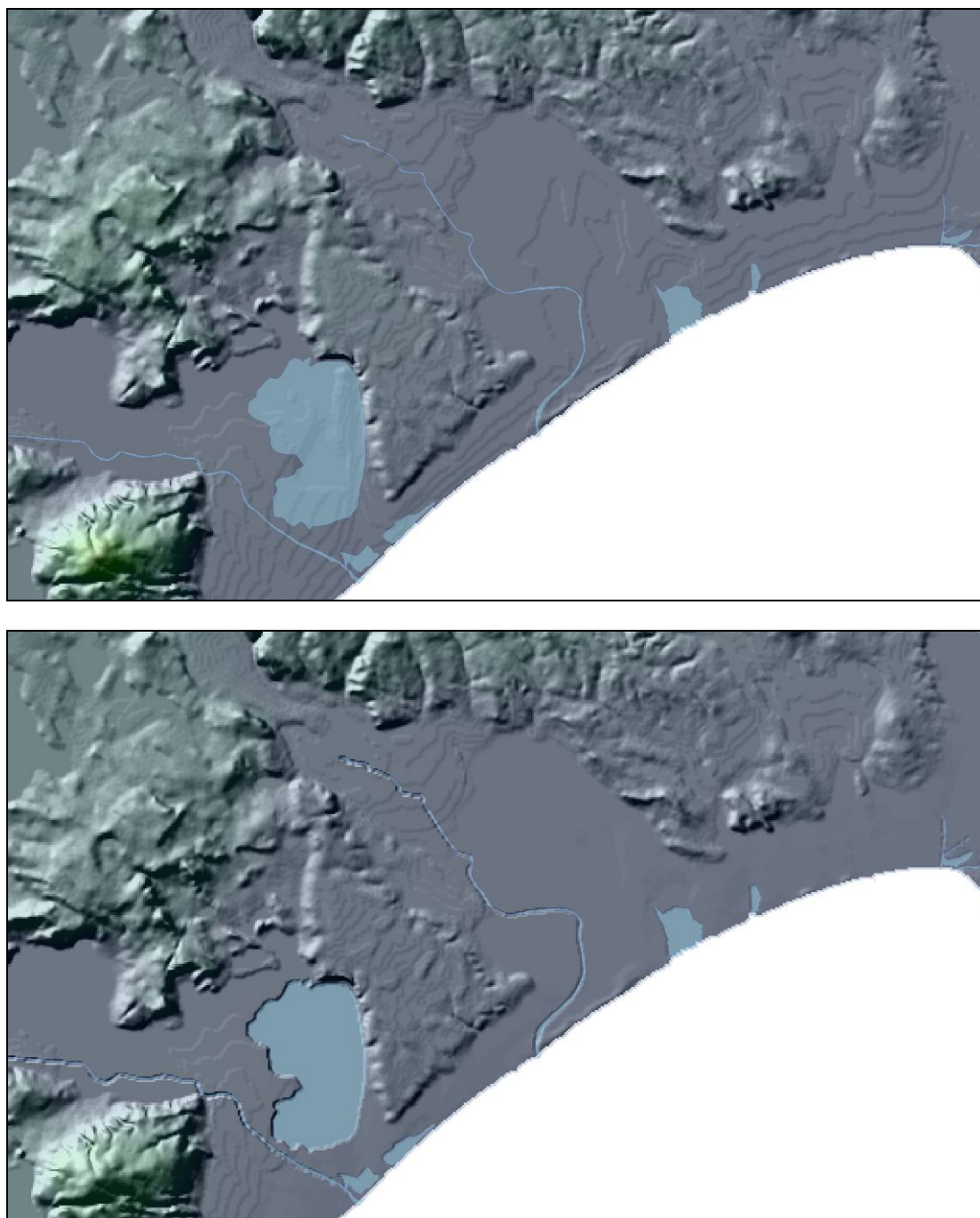


Figure 25 - Calcul du setup pour chaque segment homogène du littoral.



Figure 26 - Illustration de la surverse marine par dessus un ouvrage de protection lors de la tempête Johana de Mars 2008 (Saint-Malo).



*Figure 27 - Visualisation des zones basses entre un MNT IGN (haut)
et un MNT modifié (en bas).*

Note : Dans le MNT IGN, les valeurs des altitudes sont codées en entier créant ainsi des escaliers très visibles dans les zones plates. Le MNT a été retraité jusqu'aux altitudes de 5 m ; au-delà, ce sont les valeurs du MNT IGN qui sont utilisées. Dans le MNT modifié, les variations d'altitudes sont progressives entre chaque maille et donc plus respectueuses des morphologies. On remarque notamment que sur le MNT IGN les lagunes se situent sur des zones en pentes (!) alors que dans le MNT modifié, les lagunes s'inscrivent correctement dans la topographie.

5. Conclusions et discussion

5.1. CONCLUSIONS

En France, la plupart des travaux de caractérisation de l'aléa submersion marine actuel ne portent que sur des linéaires côtiers de quelques kilomètres. Il s'agit le plus souvent d'une évaluation à l'échelle d'une ou plusieurs communes.

La méthode la plus couramment adoptée consiste à croiser des données topographiques avec le niveau d'eau centennal à la côte. Mais cette approche commune se décline dans les études en un grand nombre de variantes, dont les différences peuvent porter sur la manière de calculer le niveau d'eau (statistiques sur les surcotes, conditions de houle, calcul du *setup*, *run-up*, etc), la qualité des données topographiques (BD Alti IGN, LIDAR...) ou encore sur les critères retenus pour caractériser le niveau d'aléa. Cette méthode a l'avantage d'être simple dans ses principes et de pouvoir être appliquée à des échelles variables. La seule étude recensée à l'échelle nationale, celle du CETE-CETMEF, repose d'ailleurs sur cette approche. Il faut toutefois garder à l'esprit que les données nécessaires à leur mise en œuvre peuvent être de qualité variable sur l'ensemble du littoral, ce qui pose problème pour l'élaboration d'une démarche commune d'évaluation de l'aléa. Les niveaux d'eau extrêmes proposés par le SHOM ne concernent par exemple que la façade Manche-Atlantique. Des données topographiques de bonne résolution/précision, nécessaires dans les zones basses à faible dénivelé, ne sont par ailleurs pas disponibles sur l'ensemble du littoral français. La plupart des Départements d'Outre-Mer bénéficient en outre d'un contexte particulier dans la mesure où l'aléa est le plus souvent lié à des événements cycloniques, qui nécessitent des traitements spécifiques en termes de calcul d'un niveau d'eau extrême. Les houles ont tendance par ailleurs à contourner les îles, ce qui ne permet pas toujours d'appliquer les formules empiriques couramment utilisées pour le calcul du *setup*. Cette méthode présente en outre plusieurs limitations:

- l'inondation n'est pas modélisée de manière rigoureuse à l'aide d'un code de calcul hydrodynamique ;
- on ne tient pas compte en général des ouvrages, si ce n'est par jugement d'expert lors de l'étape de caractérisation de l'aléa (pas d'évaluation des taux de franchissement ou de débordements par exemple) ;
- la submersion marine est considérée comme un phénomène stationnaire. Les mécanismes tels que l'érosion ou le recul d'un cordon dunaire consécutifs à la montée des eaux ne sont en général pas traités. La présence ou non d'une brèche est postulée *a priori*.

Des méthodes originales ont toutefois fait leur apparition ces dernières années. L'approche hydro-géomorphologique adoptée en Languedoc-Roussillon pour la mise en œuvre de l'Atlas des Zones Inondables par submersions marines consiste par exemple à identifier et cartographier les unités géomorphologiques caractéristiques du littoral (plage vive, cordon dunaire, plaine littorale, etc.) à l'aide de la photo-interprétation et d'études de terrain, puis d'attribuer un aléa pour chacune d'entre elles

de manière qualitative. Cette méthode semble donner des résultats cohérents dans les zones où elle a été mise en œuvre. Nous émettons toutefois des réserves sur son application à une échelle nationale. En effet :

- cette approche part du principe que les unités géomorphologiques côtières (cordon dunaire, plaine littorale...) sont des marqueurs de l'extension des inondations passées, à l'instar des lits des rivières pour l'inondation fluviale. Ce postulat est contestable car d'une part les unités géomorphologiques discriminées ne résultent pas des processus de submersion marine eux-mêmes et d'autre part, un même type géomorphologique sera soumis à différents niveaux d'aléas submersion en fonction de son orientation par rapport aux houles par exemple ;
- elle nécessite une très bonne connaissance du terrain pour pouvoir être mise en œuvre ;
- elle est difficilement applicable en cas d'importantes variations de la configuration du littoral le long de la côte. Par exemple, il n'est pas très réaliste d'attribuer le même niveau d'aléa derrière un cordon dunaire bien marqué, et un cordon en grande partie érodé culminant à une altitude proche du niveau de la mer, de même concernant l'exposition aux houles de la côte concernée.

L'approche proposée par le bureau d'étude DHI pour cartographier l'aléa submersion marine sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais et plusieurs sites sensibles dans le Morbihan est probablement la plus élaborée mise en œuvre actuellement sur les côtes françaises. Elle consiste à associer modèles numériques 1D et 2D avec des formules analytiques afin de modéliser la plupart des processus dynamiques associés à la submersion : propagation des vagues jusqu'au littoral, franchissement des défenses côtières, naturelles et artificielles, simulation de l'inondation, etc. Ce n'est toutefois pas une méthode « grande échelle » à proprement parler. Elle nécessite en effet de disposer de données bathymétriques et topographiques précises pour apporter une réelle plus-value par rapport à des méthodes moins élaborées. Elle est par ailleurs relativement coûteuse en termes de temps de calcul. Cette approche n'est donc pas forcément la plus adaptée pour la mise en œuvre de l'évaluation préliminaire du risque d'inondations. Elle reste par ailleurs perfectible sur certains aspects. Elle ne comprend pas notamment d'analyse géotechnique de stabilité des ouvrages et des protections naturelles (digues, dunes, etc.). Dans le cas où l'hypothèse d'une brèche dans une levée ne peut être totalement exclue, l'approche adoptée consiste par exemple à présenter deux cartes d'aléa : la première obtenue en tenant compte de l'ouvrage, supposé intact, et l'autre sans. Aucun critère objectif ne permet cependant de déterminer laquelle « choisir ». Celle présentant l'aléa le plus fort ? Le scénario le plus probable ? Et dans ce cas, lequel des deux ? Il pourrait être judicieux de mettre en place des critères simples permettant d'évaluer dans quelle mesure il peut ou non y avoir rupture ou brèche dans un ouvrage ou une protection naturelle.

À l'étranger, certains pays comme les Pays-Bas, le Royaume-Uni, et dans une moindre mesure les États-Unis, ont développé des approches « grande échelle » très élaborées. Elles reposent dans une large mesure sur une étude poussée du comportement des défenses côtières soumises à un événement extrême (élévation du niveau de la mer et/ou forte houle) à partir de critères simples et de formules empiriques. Ces méthodes ne sont à priori pas transposables à l'identique pour des

études sur le littoral français, en raison d'un manque d'informations sur les caractéristiques des ouvrages de protection et des cordons dunaires, ou encore en l'absence de données topographiques et bathymétriques précises sur l'ensemble du littoral. Une première version de la méthode développée par le Département de l'Environnement du Royaume-Uni (DEFRA) avait d'ailleurs été testée en 2003 en Languedoc-Roussillon dans le cadre du projet européen COASTWATCH. Les résultats de cette étude n'avaient pas été concluants (pour les raisons évoquées ci-dessus principalement).

Sur la base des résultats obtenus lors de cette analyse bibliographique, nous avons proposé trois approches dérivées de la méthode couramment adoptée consistant à croiser un niveau extrême de référence avec des données topographiques, deux pour la France métropolitaine et une pour les Départements d'Outre-mer :

- **méthode simplifiée pour la métropole** : cette approche s'appuie sur l'étude du CETE-CETMEF à l'échelle nationale. Il s'agirait de l'améliorer à plusieurs points de vue : les niveaux d'eau extrêmes pourraient être réévalués (pour tenir compte du *setup* notamment), les données historiques pourraient y être prises en compte et la validation de l'aléa à dire d'experts devrait permettre d'obtenir des résultats beaucoup plus réalistes et plus fiables dans certains contextes. Cette démarche a l'avantage de pouvoir être mise en œuvre relativement rapidement, dans la mesure où elle ne nécessite pas l'acquisition de données complémentaires. Elle reste toutefois assez grossière, du point de vue de la détermination du niveau extrême de référence en particulier ;
- **méthode simplifiée pour les DOM** : cette approche permet de traiter la question de l'aléa dans les DOM de manière simple et homogène. Elle repose essentiellement sur les observations historiques et des avis d'experts. Des méthodes propres à chaque Département d'Outre-Mer seraient toutefois plus adaptées de notre point de vue pour pouvoir tenir compte de leurs spécificités, qu'il s'agisse de l'origine de la houle (cyclonique, houles australes, alizés, etc.) ou de données disponibles sur les niveaux d'eau ;
- **méthode détaillée** : dans cette approche, la surcote associée à la houle serait déterminée de manière plus fine. Contrairement à la méthode simplifiée, on considère en effet qu'elle peut varier le long du linéaire. Nous proposons par ailleurs une démarche de traitement des données IGN qui permet d'obtenir des topographies plus réalistes, et donc d'obtenir des cartes d'aléa plus satisfaisantes. Cette approche est plus lourde en revanche à mettre en œuvre que la méthode simplifiée. Elle requière en particulier un découpage du littoral sur des critères morphologiques, géologiques, ou d'exposition qui n'est pas forcément trivial.

Le Tableau 4 résume brièvement les avantages et inconvénients des principales approches présentées dans ce rapport.

	Avantages	Inconvénients	Remarques
Croisement Niveau / topographie	Méthode « simple »	ne tient pas compte de la dynamique des tempêtes, ou de l'évolution du littoral	envisageable dans le cadre d'une évaluation préliminaire de l'aléa
Niveau extrême			
Niveaux historiques	permet de valider les modèles ou de les corriger	insuffisance des données, couverture spatiale et temporelle réduite	Devraient être déterminés systématiquement (Ex : PPR Cayenne 2001)
Niveau « évalué »	compense l'absence de données historiques pour la prédiction	doit être validé par des observations	Attention : beaucoup d'études ne tiennent pas compte du <i>setup</i> / <i>run-up</i>
➤ Calcul marée			Phénomène déterministe, valeur connue en général
➤ Calcul surcote atmosphérique			
Niveaux du SHOM	disponibles sur toute la façade Manche-Atlantique	le niveau centennal ne tient pas compte du <i>setup</i> , les surcotes sont interpolées à la côte	pas utilisable pour définir un évènement centennal (PPR Guisseny à Plouescat)
Modèles Météo France	disponibles sur la Réunion, Mayotte et les Antilles, modèle statistique	modèle numérique perfectible (conditions aux limites)	seules données disponibles en général pour les DOM (ex. : PPR Saint-François, Guadeloupe)
Eurosion	approche simple grande emprise	seulement action du vent, précision faible	ordre de grandeur de la surcote générée par le vent
➤ Calcul <i>setup</i>			difficile à mesurer directement (marégraphes)
Modèles globaux de houle (ex : WaveWatch3)	-donnent des séries temporelles de houle au large de toutes les côtes françaises	résolution ne permet pas de modéliser la houle cyclonique	peuvent être couplés avec d'autres codes (ex : SWAN) pour avoir caractéristiques de houles à la côte (ex : Cariolet et Suanez ; 2009)
Formules empiriques	facilité de mise en oeuvre	ne s'appliquent pas partout	Il n'existe pas de formule applicable partout (ex : Cariolet et Suanez ; 2009)
Calculs numériques	utilisable pour des morphologies plus compliquées (barres sous-marines par exemple)	nécessite des données bathymétriques et topographiques fines	Ex : Mayotte, Lecacheux et al (2007)
➤ Calcul <i>run-up</i>			à partir de formules empiriques le plus souvent
Formules empiriques	permettent d'obtenir un ordre de grandeur	pas adaptées dans beaucoup de cas (zones aménagées par exemple), résultats peu précis, nécessitent de bonnes données morphologiques	il n'existe pas de formule applicable partout (ex : PPR Côte sous le Vent)
➤ Avis d'experts	permet de compenser l'absence de données, validation des modèles	résultats peuvent être différents selon les experts ; problème d'homogénéité	(ex : PPR Capesterre-Belle Eau)
Topographie			
• Données IGN	Disponibles	Résolution et précision faibles	utilisables pour une évaluation préliminaire de l'aléa
• Géomètres, DGPS	Précision, ne nécessite pas de re-traitement des	seulement pour études locales, couverture spatiale réduite	pas utilisables dans le cadre d'une étude grande échelle

	Avantages	Inconvénients	Remarques
	données		
• LIDAR	résolution / précision, réalisable sur de grandes étendues	Coût élevé et traitement des données	recommandé dans les zones à risque
Méthodes particulières			
CETE-CETMEF	approche nationale, facilité mise en oeuvre	- pas de <i>setup</i> - niveaux sous-estimés - hypothèse « brèche » - manque de résolution	- envisageable pour évaluation préliminaire de l'aléa, si modifications
Approche hydrogéomorphologique (CETE Méditerranée)	résultats cohérents LR	- bases théoriques contestables	- pas forcément adaptable pour tout le littoral français (notamment si variations latérales)
Approche numérique-empirique (DHI)	calcul événement centennal, calcul d'inondation réaliste	- profils 1D - pas d'études de fragilité - 1 seul événement	- méthode la plus avancée en France à ce jour - pour échelle locale
A : recommandations FEMA	-pas très lourd en termes de calculs -peut être appliqué sur de grands linéaires	- nécessite des données topographiques et bathymétriques relativement précises -traitement assez simpliste de l'inondation	-ne peut pas être appliqué en France à l'échelle nationale (données IGN pas assez précises)
Royaume-Uni : DEFRA	-traitement statistique -prise en compte des éléments de défense -approche intégrée (côtier+littoral)	-lourd à mettre en œuvre (LIDAR, données ouvrages de protection...) -calcul d'inondation simpliste (ne permet pas de déterminer les vitesses)	- méthode très avancée - pas applicable en France avant plusieurs années
Pays-Bas : projet FLORIS	-traitement statistique -prise en compte des éléments de défense -approche intégrée (côtier + littoral)	-lourd à mettre en œuvre (LIDAR, données ouvrages de protection...)	- méthode très avancée - pas applicable en France avant plusieurs années
Propositions de méthode			
Méthode simplifiée	- peut être rapidement mise en œuvre - ne nécessite pas d'acquisition de données complémentaires - version améliorée de celle du CETE-CETMEF	-le <i>setup</i> est évalué de manière très grossière -l'emprise de l'aléa est « maximisante »	-version améliorée de l'approche CETE-CETMEF, mais qui reste grossière
Méthode détaillée	- tient compte de la variabilité du <i>setup</i> - découpage plus pertinent du linéaire - amélioration topographie	- plus longue à mettre en œuvre que méthode simplifiée - pas « événement centennal »	- par rapport à la méthode simplifiée : meilleure résolution (niveau+topo) mais plus longue à mettre en œuvre
Méthode DOM	- rapidité de mise en oeuvre	-approche grossière	- approche homogène donc grossière. Des études séparées pour chaque DOM seront nécessaires par la suite.

Tableau 4 - Avantages et inconvénients des principales approches présentées dans ce rapport.

5.2. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Les méthodes élaborées au Royaume-Uni et aux Pays-Bas constituent aujourd'hui l'état de l'art pour l'évaluation du risque submersion marine aux échelles locale et nationale. Elles ne doivent pas forcément être perçues comme une sorte « d'idéal » à atteindre, mais mettent toutefois en exergue certaines des carences françaises dans ce domaine.

Il semble évident notamment que la mise en place de méthodes élaborées n'aura d'intérêt qu'à partir du moment où l'on disposera de données bathymétriques et topographiques précises avec une grande résolution. Ceci est particulièrement vrai pour les côtes basses présentant un dénivelé assez faible. L'utilisation du LIDAR (qui permet de couvrir rapidement des zones assez étendues) devrait ouvrir de nouvelles perspectives en matière de cartographie de l'aléa submersion marine. Des données altimétriques un peu moins précises (mais moins coûteuses) telles que INTERMAP pourraient être suffisantes cependant pour des études préliminaires.

Il faudrait être en mesure par ailleurs de mener des analyses de stabilité des défenses littorales (cordon dunaire, ouvrages, etc.) dans les sites « sensibles ». Des études de terrain seront indispensables afin de collecter l'ensemble des données nécessaires.

L'approche statistique consistant à cartographier l'inondation pour un événement centennal de référence n'est probablement pas la plus adaptée. Il serait préférable de raisonner en termes de *probabilité d'excéder une certaine valeur de hauteur et de vitesse d'eau* dans la zone inondée. Illustrons nos propos par un cas simple : la caractérisation de l'aléa dans un polder par une approche similaire à celle développée par DHI. La méthode des Probabilités Jointes indique qu'il existe un grand nombre de couples de valeurs « niveau d'eau/hauteur de vagues » possibles pour générer un événement centennal (voir Figure 13). En d'autres termes, il existe un grand nombre d'événements de référence envisageables pour l'étude de l'aléa : une surcote assez faible combinée à de fortes houles, une élévation importante du niveau d'eau avec une houle modérée, etc. Choisissons un de ces scénarios (celui qui paraît, *a priori*, le plus plausible). Si la digue protégeant le polder présente des caractéristiques ne permettant pas le passage de l'eau, la conclusion sera que l'aléa en arrière de la digue est nul (ou très faible). Or il est tout à fait possible que le choix d'un autre événement de référence, considéré comme « moins plausible », permette quant à lui un franchissement de l'ouvrage. Les conclusions peuvent donc être très différentes selon le choix effectué. Il est préférable dans ce cas de figure d'adopter une autre stratégie :

- créer un ensemble d'événements susceptibles de se produire, et évaluer leur probabilité d'occurrence en fonction des observations ;
- caractériser l'inondation (hauteurs et vitesses d'eau) pour *chacun* de ces événements ;
- établir des cartes indiquant les valeurs de hauteurs et de vitesses d'eau centennales dans la zone inondée, en considérant l'ensemble des résultats de l'étape précédente avec leur probabilité associée.

Ce type d'approche permettrait de s'assurer, pour revenir à notre exemple, que l'on tient compte de tous les scénarios envisageables (franchissement ou non de l'eau par-dessus la digue). La carte d'aléa sera en quelque sorte une « *somation des cartes d'aléa envisageables, pondérées par leur probabilité d'occurrence* ». Prenons un exemple concret simplifié :

- supposons que l'étude statistique initiale ait permis d'identifier deux évènements centennaux. Le premier ne génère pas d'inondation derrière la digue, tandis que le second induit des hauteurs d'eau de 1 m ;
- avec l'approche généralement adoptée, on obtiendra une hauteur de 0 ou de 1m en arrière de l'ouvrage, selon le choix de l'évènement ;
- Si l'on considère la seconde approche, on obtiendra une unique carte (indiquant une hauteur de 50 cm), beaucoup plus représentative de l'aléa réel.

La Figure 28 donne une représentation schématique d'un exemple de stratégie envisageable pour mieux évaluer l'aléa submersion marine.

Enfin, rappelons que le changement climatique et la remontée du niveau de la mer associée influent sur les processus intervenants dans la submersion marine. Ils devront donc être intégrés dans les prochaines évaluations de cet aléa.

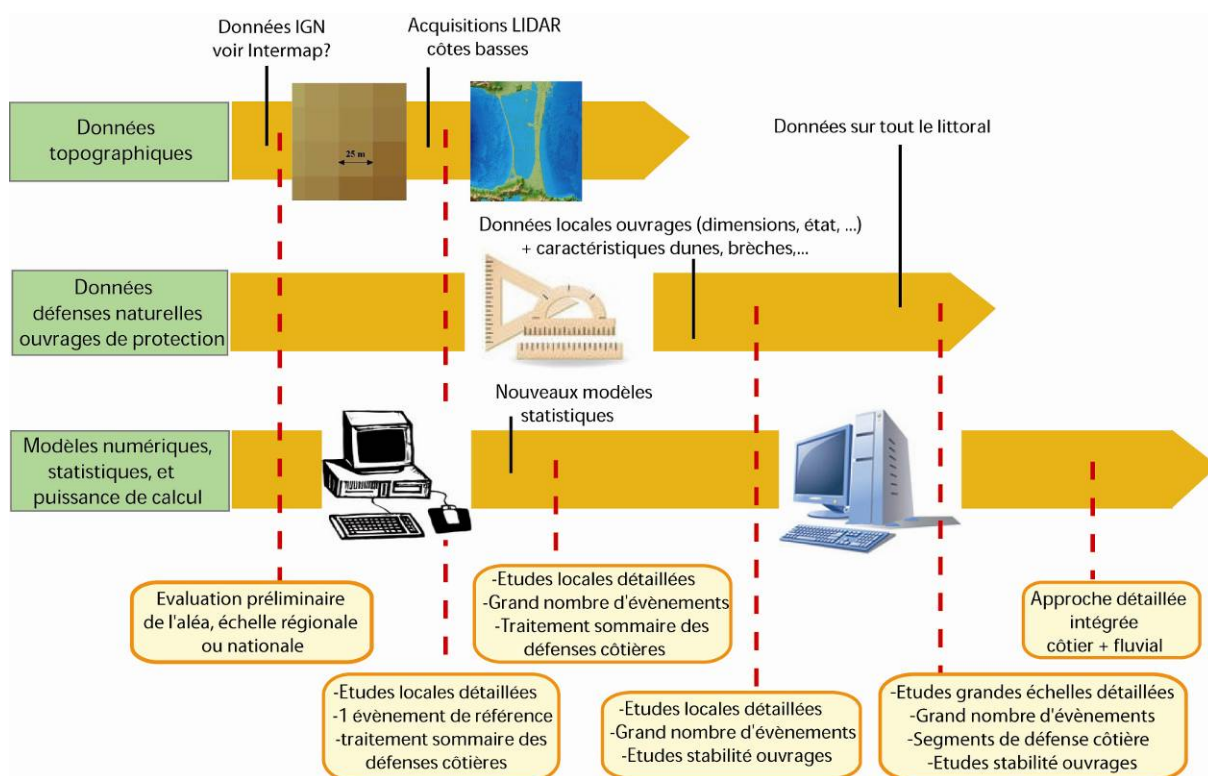


Figure 28 - Exemple schématique de stratégie pouvant être envisagée pour une meilleure évaluation de l'aléa submersion marine.

6. Références bibliographiques

Ahrens J.P. (1981) - Irregular wave run-up on smooth slopes. CETA No. 81-17, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Ft. Belvoir, VA.

Anselme B., Durand P., Goeldnet-Gianela L. (2008) - Le risque de submersion dans le système lagunaire de La Palme (Languedoc, France): nature de l'aléa et perception du risque. Colloque international pluridisciplinaire « *Le littoral : subir, dire, agir* » - Lille, France, 16-18 janvier 2008.

Battjes J.A. (1974) - Run-up distributions of waves breaking on slopes. *ASCE J. Waterw., Harbors Coastal Eng. Div.* 92, p. 91-114.

Benoit M.; Marcos F., Becq F. (1996) - Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing. Proc. 25th Int. Conf. On Coastal Eng. (ICCE'1996), Orlando (Floride, USA), p. 465-478.

Benoit M., Lafon, F., Goasguen G. (2006) - Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 23 ans. IX^e Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest.

Booij N., Haagsma IJ.G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg A.T.M.M., Ris R.C., Van der Westhuysen A.J., Zijlema M. (2004). Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115 p.

BRGM (2000) - Plan de prévention des risque naturels littoraux de l'Ile de Cayenne – Communes de Cayenne, Rémire-Montjoly, Matoury, Cartographie de l'aléa. Rapport BRGM/RP-50475-FR.

Cariolet J.M., Suanez S. (2009) - Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses. *La Houille Blanche*, n° 2 (Mai 2009), p. 52-58.

CETMEF-CETE (2009) - Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux – France métropolitaine (Rapport provisoire, Décembre 2009). 41 p., 17 fig.

Chaverot S. (2006) - Impacts des variations récentes des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord-Pas-de-Calais. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 266 p.

De La Torre Y. et Louzé J., collab. Dewez T. (2008) - Méthodologie pour l'évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion. Phase 2. Rapport BRGM/RP-56589-FR, 36 p + annexes.

De Waal J.P., Van Der Meer J.W. (1992) - Wave run-up and overtopping on coastal structures. Proceedings of the 23rd International Coastal Engineering Conference, vol.2. *American Society of Civil Engineers*, p. 1758-1771.

EA (1998) - Wave Overtopping of Sea Walls: Design and assessment manual. R&D report produced by HR Wallingford Ltd. W5/006/2.

Federal Emergency Management Agency (1988) - Wave Height Analysis for Flood Insurance Studies (Technical Documentation for WHAFIS Program Version 3.0). Washington D.C., September.

Federal Emergency Management Agency (1990) - Criteria for Evaluating Coastal Flood Protection Structures for National Flood Insurance Program (NFIP) Purposes. Memorandum from Harold Duryee, FIA Administrator to FEMA Regional Directors. April 23, 1990. 7 p.

Federal Emergency Management Agency (2007) - Atlantic Ocean and Gulf of Mexico Coastal Guidelines Update. Final Draft, February 2007.

Hawkes P.J., Gouldby B.P., Tawn J.A., Owen M.W. (2002) - The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. *Journal of Hydraulic Research*, 3 (40).

Hawkes P.J. (2005) - Use of Joint Probability Methods in Flood Management. A guide of Best Practice. Technical report FD2308/TR2, Defra/Environment Agency, March 2005.

Holman R.A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9, p. 527-544.

Holman R.A., Sallenger A.H. (1985) - Set-up and swash on a natural beach. *Journal of geophysical research*, 90 (C1), p. 945-953.

HR Wallingford and Lancaster University (2000) - The joint probability of waves and water levels: JOIN-SEA: A rigorous but practical new approach. HR Wallingford Report SR 537.

Institute of Hydrology (1999) - Flood Estimation Handbook (in 5 volumes). Institute of Hydrology, Wallingford.

IPET (Interagency Performance Evaluation Task Force) (2008) - Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System. Final Report, 9 volumes.

Lecacheux S., Balouin Y., De La Torre Y. (2007) - Modélisation des vagues d'origine cyclonique à Mayotte. Rapport BRGM/RP-55981-FR, 100 p., 62 fig.

Lebreton P., Perherin C. (2009) - Un diagnostic des méthodes de prévision des niveaux marins extrêmes sur les côtes vendéennes. Perspectives d'amélioration. *La Houille Blanche*, n° 1, 2009.

Marche F., Bonneton P., Fabrie P. and Seguin N. (2007) - Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53: p. 867-894.

Mase H. (1989) - Random wave run-up height on gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 115, no. 5. *American Society of Civil Engineers*, p. 649-661.

MATE/METT (1996) - Cartographie des zones inondables, approche hydrogéomorphologique. Les Editions Villes et Territoires – 100 pages.

National Academy of Sciences (NAS). (1977) - Methodology for Calculating Wave Action Effects Associated with Storm Surges. Washigton, D.C.

Natural Environment Research Council (1975) - Flood Studies Report.

Nielsen P., Hanslow D.J. (1991) - Wave run-up distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 4(7), p. 1139-1152.

Owen M.W. (1980) - Design of seawalls for wave overtopping. HR Wallingford Report EX924.

Peeters P., Schoorens J., Le Cornec E., Michard B., Lechat M. (2009) - Définition de l'aléa submersion marine sur le site de la Grande Plage de Gâvres (Morbihan). *La Houille Blanche*, n° 1 (Mars 2009), p. 45-51.

Pirazzoli P.A., Tomasin A. (2008) - Return time of extreme sea levels in the central Mediterranean area. *Bolletino Geofisico*, 31 (1-4): p. 19-33.

Saville T. Jr. (1958) - Wave Run-up on Composite Slopes. Pages 101-108 in *Proceedings of the 6th Coastal Engineering Conference held in Gainesville, FL. Coucil of Wave Research, University of California*, 1958.

Scheffner N.W., Clausner J.E., Militello A., Borgman L.E., Edge B.L. (1999) - Use and application of the Empirical Simulation Technique: Use Guide. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi, Technical Report CHL-99-21.

Shore Protection Manual (1984) - U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 4th ed. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Simon B. (2008) - Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique. CD-ROM. ISBN: 978-2-11-098357-2, référence CETMEF: C 08-05.

SOGREAH (1995) - Étude de l'évolution du littoral sableux de la Camargue. Rapport, 3 volumes, 400 p.

Stoa P.N. (1978) - Reanalysis of Wave Run-up on Structures and Beaches. US. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Ft. Belvoir, VA. TP 78-2.

Stockdon H.F., Holman R.A., How P.A., Sallenger A.H. Jr. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and run-up. *Coastal Engineering*, 53, p. 573-588.

Suanez S., Prosper-Laget V., Provansal M. (1997) - Variation relative du niveau marin dans le delta du Rhône, implications tectoniques et/ou climatiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 324, série I1 a, p. 639-646.

Vrouwenvelder A.C.W.M., Steenbergen H.M.G.M., Slijkhuis K.A.H. (2001) - Theoretical manual of PC-Ring, Part A: descriptions of failure modes (in Dutch). Nr.98-CON-R1430, Delft 2001.

Wu J. (1980). Wind stress coefficients over sea surface near neutral conditions - A revisit. *J. Phys. Oceanogr.* 10: p. 727-740.



Centre scientifique et technique
Service risques naturels et sécurité du stockage du CO₂
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34