

Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

Cahier technique



Guide : ouvrage de référence à vocation méthodologique

Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

Cahier technique

Collection | **Connaissances**

Préambule

Ce document est issu d'études réalisées à la demande de la Direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE).

Ces études visaient la production d'outils méthodologiques pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux. L'élaboration de ces plans nécessite la réalisation d'une étude d'aléas, dont la première phase est une analyse du fonctionnement physique du littoral (sujet traité par ce fascicule), milieu complexe où de multiples phénomènes hydro-sédimentaires interagissent. La caractérisation et la cartographie des aléas (sujet traité par le guide méthodologique¹ Plans de Prévention des Risques Littoraux) s'appuient sur cette analyse préalable.

L'analyse, exposée dans ce fascicule, du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral est également une base fondamentale des études d'ouvrages et d'aménagements portuaires et littoraux. L'intérêt du fascicule dépasse donc la problématique de la prévention des risques.

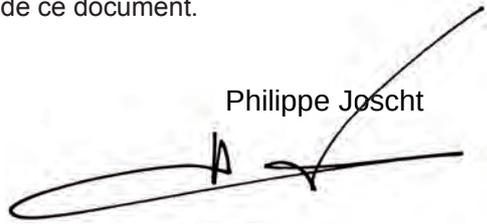
Ces documents ont été élaborés, de 2011 à 2013², au sein de groupes de travail thématiques.

Catherine AZZAM (DGPR), Josiane BADO (DDTM 17), Ludovic BOCQUIER (DREAL Pays de Loire), François BOUTTES (CETMEF), Édouard BRODHAG (CERTU), Gérard COBIGO (DDTM 85), Stéphane COSTA (Université de Caen), Yann DENIAUD (CETE Nord-Picardie), Guy DESIRE (CETE Ouest), Jean-Paul DUCATEZ (DHI), Virginie DUVAT (Université de La Rochelle), Mohamed EL FADILI (CETMEF), Bénédicte EZVAN (SHOM), Didier FELTS (CETE Sud-Ouest), Nicolas FLOUEST (CETE Sud-Ouest), Loïc GOUGET (ONF), Nicholas GRUNNET (DHI), Bénédicte GUERINEL (DREAL Languedoc-Roussillon), Bernard GUEZO (CERTU), Luc HAMM (ARTELIA), François HEDOU (CETMEF), Marc IGIGABEL (CETMEF), Mathieu HELLEGOUARCH (DHI), Julien HENIQUE (DREAL Nord-Pas de Calais), Xavier KERGADALLAN (CETMEF), Boris LECLERC (DGPR), Erwan LE CORNEC (GEOS), Fabrice LECORNU (IFREMER), Régis LEYMARIE (Conservatoire du Littoral), Franck LEVOY (Université de Caen), Carlos OLIVEROS (BRGM), Rodrigo PEDREROS (BRGM), Pierre PEETERS (HYDRATEC), Céline PERHERIN (CETMEF), Frédéric PONS (CETE Méditerranée), Frédéric RAOUT (DGALN), Amélie RENAUD (DGPR), Florence RICHARD (DREAL Bretagne), Amélie ROCHE (CETMEF), Céline ROUX (SHOM), Nicolas ROUXEL (CETE Ouest), Marie-Hélène RUZ (Université du Littoral – Côte d'Opale), François SABATIER (Aix-Marseille Université - CEREGE), Isabelle SCHALLER (DDTM 17), Anne SOUQUIERE (CETMEF), Serge SUANEZ (Université de Bretagne Occidentale/IUEM), Anne-Laure TIBERI-WADIER (CETMEF), Céline TRMAL (CETE Méditerranée), Cyril VANROYE (DDTM 85)

sous la direction de Stéphane Costa (université de Caen/UMR-LETG-Géophen) et Céline Perherin (Cetmef puis Cerema).

Le Cerema remercie l'ensemble des contributeurs pour leur investissement et la qualité de leur production et plus particulièrement la DGPR pour son rôle déterminant dans la genèse de ce document.

Philippe Joscht



Directeur de la Direction technique
Eau, mer et fleuves

¹ Disponible sur le catalogue numérique du portail de la prévention des risques majeurs (http://catalogue.prim.net/238_guide-methodologique-plan-de-prevention-des-risques-littoraux.html)

² Les organismes cités sont ceux auxquels les participants appartenaient. En particulier cela explique les références aux CETE, au Certu et au Cetmef qui ont été intégrés au sein du Cerema en 2014.

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	1
1 - INTRODUCTION.....	5
2 - PRÉREQUIS TECHNIQUES CONCERNANT LA CONNAISSANCE DES PHÉNOMÈNES ET ALÉAS LITTORAUX.....	7
2.1 - Les formes littorales.....	8
2.1.1 -Les côtes basses meubles.....	8
2.1.2 -Les côtes à falaises.....	8
2.1.3 -Baies, estuaires et deltas.....	8
2.2 - Les ouvrages de protection.....	10
2.3 - Phénomènes météo-marins.....	12
2.3.1 -Le niveau marin.....	12
2.3.1.a - Le niveau moyen de la mer.....	12
2.3.1.b - La marée théorique.....	12
2.3.1.c - Les surcotes / décotes.....	12
2.3.2 -Les effets hydrodynamiques et météorologiques locaux.....	13
2.3.2.a - Le déferlement des vagues.....	13
2.3.2.b - Les seiches.....	14
2.3.3 -Les tsunamis.....	14
2.3.4 -Le changement climatique.....	14
2.4 - Aléas littoraux.....	16
2.4.1 -Le recul du trait de côte.....	16
2.4.2 -La migration dunaire.....	17
2.4.3 -La submersion marine.....	17
3 - MÉTHODE D'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDRO-SÉDIMENTAIRE DU LITTORAL.....	20
3.1 - Une méthode d'analyse des aléas littoraux en deux temps.....	21
3.2 - Principes généraux du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral.....	24
3.3 - Fonctionnement hydro-morphosédimentaire du secteur d'étude.....	26
3.3.1 -Analyse du cadre géomorphologique.....	26
3.3.1.a - Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.....	26
3.3.1.b - Les caractéristiques sédimentologiques des plages.....	28
3.3.1.c - Les caractéristiques topo-bathymétriques.....	28
3.3.1.d - Caractéristiques morpho-sédimentaires et bathymétriques des fonds et de l'estran.....	30
3.3.2 -Analyse des conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques.....	31
3.3.2.a - Contexte climatique et météorologique.....	31
3.3.2.b - Les conditions hydrodynamiques.....	31

3.3.3 -Fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral.....	33
3.3.3.a - La cellule hydro-sédimentaire.....	33
3.3.3.b - Le trait de côte : modalités de définition et limites.....	35
3.3.3.c - Le profil de plage : modalités de définition et limites.....	39
3.3.3.d - Le système dune-plage : un transport sédimentaire lié au vent.....	39
3.3.3.e - Les transports sédimentaires sous l'action des houles et des marées.....	40
3.3.3.f - L'analyse du recul des falaises : actions continentales et marines.....	43
3.3.4 -Les ouvrages de protection contre les aléas littoraux.....	45
3.3.5 -Analyse du fonctionnement hydraulique du site.....	46
3.4 - Approche historique.....	47
3.4.1 -Évolution du trait de côte.....	47
3.4.1.a - L'analyse diachronique de la dynamique côtière.....	47
3.4.1.b - L'estimation des vitesses et des rythmes d'évolution.....	48
3.4.2 -L'inventaire des submersions marines historiques.....	50
3.4.3 -L'évolution de l'occupation humaine : modes d'urbanisation et occupation du sol.....	54
3.5 - Synthèse de l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral : identification des facteurs à l'origine des aléas littoraux.....	58
3.5.1 -Le recul des côtes rocheuses et à falaises.....	58
3.5.2 -Le recul des côtes basses meubles et la migration dunaire.....	58
3.5.3 -La submersion marine.....	59
3.5.4 -Résultats attendus.....	60
4 - CONCLUSION.....	61
5 - GLOSSAIRE TECHNIQUE.....	63
6 - SIGLES.....	66
7 - PRINCIPALES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	68

1 - Introduction

D'une grande attractivité, les espaces littoraux font l'objet d'enjeux actuels et futurs importants. On estime en 2010, à près de 7,8 millions le nombre de personnes habitant en bord de mer (métropole et Dom), dont plus de 6,1 millions de métropolitains soit près de 12 % de la population métropolitaine sur 4 % du territoire.

La population des communes littorales a augmenté de plus de 500 000 habitants entre 1999 et 2010, soit +7 %. De 1962 à 2010, la population littorale métropolitaine a connu un accroissement de 1,8 million d'habitants (+41 %), soit 83 habitants en plus par km² portant la densité des zones littorales à 285 hab/km² contre une moyenne de 138 hab/km² sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Ces secteurs sont, de manière générale, dynamiques en termes d'emplois puisque les départements littoraux de métropole regroupent, en 2011, 8,9 millions d'emplois soit un tiers des emplois hexagonaux (34 %).

A partir de projections de l'Insee, l'Observatoire national de la mer et du littoral³ indique que l'installation de nouveaux habitants sur les façades littorales devrait se poursuivre. Ainsi, le scénario central de projection démographique considère que la population des départements littoraux augmentera plus rapidement que celle des autres départements. Cette évolution serait ainsi, à horizon 2040, de +19 % pour les départements littoraux et de +13 % par ailleurs représentant 3,9 millions de métropolitains supplémentaires en bord de mer et 660 000 pour les DOM. 40% de la population française vivrait, dès lors, dans les départements littoraux.

³ Pour plus d'information, voir : www.onml.fr

En tirant parti des caractéristiques de ces milieux, l'Homme a, à des degrés divers, imprimé sa marque tout au long de la côte. Ses activités et les infrastructures qui y sont associées ont, elles-mêmes, modifié les dynamiques naturelles rendant nécessaire la qualification de leur impact et, par suite, la réflexion sur leur vulnérabilité. Aussi, il faut garder à l'esprit que la mer peut constituer une menace si tous les aspects de la cohabitation avec elle n'ont pas été suffisamment intégrés dans le développement littoral. Pour illustrer cette considération, en 2012, 1,4 million de Français sont potentiellement exposés aux submersions marines ainsi que 850 000 emplois.

Les événements tragiques des dernières années ont renforcé la nécessité de prendre en compte davantage les conséquences d'épisodes climatiques majeurs. Afin de mieux connaître, anticiper voire réduire ces conséquences, des plans de prévention des risques littoraux (PPRL) sont mis en place ou révisés. Détaillée dans un ouvrage à part entière, le guide méthodologique sur l'élaboration des PPRL, la démarche ne sera pas présentée dans ce fascicule. On retiendra néanmoins que les PPRL sont des outils préventifs portant sur les règles d'urbanisme dans des secteurs soumis à des risques. Trois temps rythment leur élaboration :

- Il s'agit, en premier lieu, d'étudier les aléas pour pouvoir ensuite délimiter les zones qui y sont, directement ou indirectement, exposées.
- Par suite, l'analyse des enjeux permet de mieux comprendre la structure et le fonctionnement du bassin de vie. Elle fait ressortir les principaux points de vulnérabilité du territoire.
- Pour finir, au regard des zones à risque, il convient de définir le règlement du PPRL contenant les mesures de prévention, de protection ou de sauvegarde devant être mises en œuvre dans les zones directement ou indirectement exposées au risque et le zonage réglementaire associé.

Ce phasage particulier de la méthode doit rappeler qu'élaborer de tels plans nécessite une connaissance scientifique et technique approfondie des milieux concernés. Aussi la démarche de réduction des risques littoraux doit à la fois être unifiée mais ne doit pas, pour autant, occulter les réalités, variées, de chaque territoire. En ce sens, ce fascicule vient se placer comme une grille de lecture à même d'orienter et de guider une réflexion sur l'analyse des phénomènes qui, au contact des enjeux présents sur la côte, peuvent devenir des risques.

Comprendre le fonctionnement de tels milieux nécessite de faire appel à de nombreuses disciplines dans une optique de transversalité afin d'assurer la cohérence de l'analyse. À la limite entre la terre et la mer, elles nécessitent de poser les définitions adéquates, à des échelles adaptées et pour des références pertinentes. C'est l'objet du chapitre 2. Les formes littorales, les phénomènes qui les façonnent et auxquels elles sont confrontées y sont présentés afin de guider le lecteur vers les typologies d'aléas susceptibles de se manifester sur le territoire d'étude considéré. Son attention doit également se porter sur le recensement des systèmes de protection susceptibles d'impacter le fonctionnement naturel.

Ces définitions posées, le chapitre 3 présente la démarche d'étude des aléas littoraux. Cette démarche, suivie pour l'élaboration des PPRL, n'est cependant pas spécifique à ce type de démarche. Toute étude d'aléas littoraux suit le même déroulement, en deux phases :

- l'analyse du fonctionnement du littoral, dont la méthode est identique quelle que soit l'étude d'aléa littoraux, décrite dans le chapitre 3,
- la caractérisation et la cartographie des aléas, dont la méthodologie est spécifique à l'objectif de la cartographie, non décrite dans ce document.

Le chapitre 3 recense notamment les principales données à prendre en compte ainsi que leur éventuel fournisseur. Il s'agit de réaliser une caractérisation du site sur la base de ses dynamiques récentes, principalement par un recensement de la bibliographie et d'observations de terrain, et de mettre ces éléments en perspective à l'aide d'une étude historique. Ces études historiques sont d'un intérêt certain. Outre la confrontation des hypothèses retenues, elles permettent d'intégrer de nombreux acteurs à la démarche. La collecte d'information souvent fastidieuse du fait du nombre important d'organismes ou de personnes ressources doit, en effet, asseoir la réalisation de l'étude auprès des acteurs du territoire considéré. Cette implication devra être recherchée dans toutes les étapes ultérieures de l'élaboration du PPRL telles que présentées dans le guide méthodologique.

2 - Prérequis techniques concernant la connaissance des phénomènes et aléas littoraux

En raison d'influences multiples, les caractéristiques des agents météo-marins, la position du rivage et la morphologie côtière fluctuent aux différentes échelles de temps et d'espace. Une bonne connaissance des relations fluctuantes entre les formes littorales et les influences subies est le préalable, d'une part, à une gestion cohérente et durable des milieux fragiles et mobiles que sont les littoraux, et d'autre part, à la prévision et la prévention des aléas induits : recul du trait de côte, submersion marine, migration dunaire.

2.1 - Les formes littorales

Le littoral français métropolitain présente une grande variété de paysages et de morphologies côtières : des côtes sableuses (40 %), des côtes rocheuses (50 %) et des marais et vasières (10 %) (IFEN, 2007). Cette simplification occulte l'une des caractéristiques du littoral qui est sa diversité morphologique, accentuée par de nombreuses indentations (baies, golfes, rias, abers, estuaires, deltas...). « *La gestion du trait de côte* » (MEEDDM, 2010) décrit plus finement ces formes littorales.

2.1.1 - Les côtes basses meubles

Les côtes basses meubles sont principalement représentées par les plages et les dunes littorales. Les plages sont dites dissipatives lorsque la pente de la plage est peu importante et que les vagues déferlent plus fortement, entraînant beaucoup de sédiments, et dites réfléchives lorsque la pente est plus forte. A ces deux grandes familles s'ajoutent des formes de plages comme celles en fond de baie, des plages ouvertes, des flèches littorales...

Tous ces profils de plages sont amenés à évoluer selon des facteurs naturels (vagues, vents) et anthropiques (piétinement des cordons naturels, constructions balnéaires et portuaires, extractions...).

Le relief des dunes littorales est construit et façonné par le vent. Les milieux côtiers constituent donc un lieu privilégié de ces formations puisque très soumis aux actions du vent. Ces dépôts sableux peuvent être stabilisés grâce à la présence de végétaux, on parlera dans ce cas de dune fixée ou « dune grise ».

2.1.2 - Les côtes à falaises

Les falaises sont des escarpements, le plus souvent rocheux, créés par l'érosion le long d'une côte. Leurs hauteurs sont variables. Elles peuvent atteindre parfois une centaine de mètres en Normandie. On peut distinguer :

- des falaises vives, qui se reconnaissent à la présence d'une encoche à la base, montrant son contact avec la mer et l'action érosive de celle-ci,
- des falaises stabilisées et les falaises mortes, situées en arrière du littoral et n'étant plus en contact avec la mer,
- des falaises situées en arrière littoral mais en érosion du fait des actions terrestres (infiltration, gel...).

Les falaises peuvent évoluer du fait de l'érosion de leur pied quand elle est attaquée par les vagues, créant une encoche, et/ou du fait de l'érosion de leur partie haute où les processus éoliens et de ruissellement sont dominants. Toutes ces actions dépendent de la nature de la roche et de la présence d'eau. Au pied des falaises se trouvent généralement les restes de leurs effondrements progressifs sous la forme d'amas de roches et/ou la présence d'un platier rocheux, témoin du recul.

2.1.3 - Baies, estuaires et deltas

Les baies sont des échancrures du littoral dans lesquelles se jettent généralement un ou plusieurs fleuves. Les baies faiblement exposées aux conditions hydrodynamiques sont généralement peu profondes et forment des espaces littoraux complexes à appréhender.

Les estuaires représentent une catégorie originale de formes littorales. Ils se caractérisent par la pénétration d'eaux salées au sein de l'aval d'un système fluvial, au gré des marées. Le rapport de force est permanent entre eaux du fleuve et eaux maritimes, d'où un régime hydrologique complexe où peuvent se conjuguer inondations d'origine continentale et submersions marines. La limite amont de l'estuaire est le plus souvent déterminée par la zone maximale où pénètre l'onde de marée. La salinité est un bon indicateur de cette limite.

Des barrages et des écluses ont parfois été construits dans les parties aval des estuaires ou de leurs affluents afin de les soustraire aux intrusions marines. Ils ont donc un rôle non négligeable dans la prévention des submersions marines.

Les deltas sont formés par l'accumulation d'alluvions à l'embouchure des fleuves. Leur édification nécessite des apports alluviaux importants et un contexte hydrodynamique de faible énergie (houle modérée et faible marnage). Il s'agit d'un espace dynamique, mobile et fréquemment submergé par des crues continentales et par des intrusions marines.

Ces trois types de milieux sont susceptibles de présenter des marais maritimes, espaces littoraux bas, souvent constitués d'alluvions récentes et naturellement inondables. Ils se forment sur des côtes protégées de l'énergie de la houle, quand les profondeurs sont peu importantes et quand la charge fine en suspension dans les eaux littorales est abondante. Ils peuvent être soumis à la fois à l'influence des marées et à celles des eaux douces.

Certaines de ces zones basses ont été conquises depuis le début du Moyen âge, connaissant ainsi drainage, assèchement et endiguement, menant à la création de polders. L'influence de la mer demeure, notamment par la régulation des entrées d'eau dans les marais au réseau hydrographique, toujours dense.

2.2 - Les ouvrages de protection

Les « ouvrages de défense contre les aléas littoraux » sont des structures côtières construites et dimensionnées pour répondre à une vocation initiale de fixation du trait de côte, de lutte contre l'érosion, de soutènement des terres, de réduction des franchissements, de dissipation de l'énergie de la houle ou d'obstacle à l'écoulement (*Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers - Notice méthodologique - CETMEF, 2011*).

En France métropolitaine, les ouvrages de défense contre la mer s'étendent ainsi sur 1 350 km de côtes, soit un cinquième du linéaire côtier métropolitain (IFEN, 2007). Ils sont de nature très diverses et sont particulièrement présents dans le Pas-de-Calais, la Manche, de la Bretagne à l'estuaire de la Gironde, dans le Languedoc-Roussillon et sur la Côte d'Azur. La lutte contre l'érosion et la submersion marine a longtemps conduit à la construction d'ouvrages par des méthodes dites « dures » ou « rigides » : murs, perrés, épis ou brises-lames. Puis, une gestion avec des méthodes « souples » ou « douces » a émergé avec les rechargements de plage, plantations et suivi du couvert végétal notamment.

Encart 1 : Typologie des structures côtières de protection anthropiques (CETMEF).

Ouvrages de soutènement

Les ouvrages de soutènement, qui comprennent les murs (murs poids ou en béton armé) et soutènements plans (rideaux de palplanches...), servent au maintien direct du trait de côte en s'opposant à la poussée des terres ; ils permettent ainsi de lutter contre l'érosion des terres.

Leurs caractéristiques principales sont une orientation longitudinale sur le trait de côte ou en arrière-côte, et une pente verticale à légèrement inclinée. Ces ouvrages sont particulièrement sensibles aux problèmes d'affouillement à leur pied dus à leur forte réflectivité, provoquant des désordres sur l'ouvrage. Ils sont ainsi souvent accompagnés d'une protection de pied et parfois d'un couronnement de manière à éviter la projection de paquets de mer en arrière de l'ouvrage. Ils sont aussi sensibles aux infiltrations d'eau côté terre et à leur mise en charge, c'est pourquoi ils sont souvent traversés par des barbacanes.

Digues côtières

Les digues sont des ouvrages généralement longitudinaux faisant obstacle à l'écoulement. Ils possèdent deux talus visibles (côté terre et côté mer) éventuellement confortés.

Ces ouvrages ont pour fonction principale la protection contre la submersion et permettent de protéger des enjeux. Ils peuvent être situés sur le trait de côte ou en arrière-côte en tant que protection de seconde défense.

La présence d'ouvrages hydrauliques (portes-à-flots, clapets anti-retour...) est souvent associée à la présence de digue permettant un système de protection continu de la zone protégée lors d'échanges hydrauliques avec l'extérieur de cette zone.

Perrés (non associés à des digues)

Les perrés sont des ouvrages longitudinaux inclinés, constitués d'un revêtement (en maçonnerie, béton, enrochements liés ou non) recouvrant un talus autostable. Ils assurent un maintien du trait de côte immédiat dès leur construction et, dans certains cas, la protection des terres contre la submersion marine.

Leur rôle se limite à une protection superficielle du talus sous-jacent. Ils n'ont aucune action sur la stabilité en masse du talus. Contrairement à un ouvrage de soutènement, le revêtement de talus n'a pas un rôle mécanique (vis-à-vis de la tenue des terres) mais seulement un rôle de protection. La cote d'arase, ou crête, des perrés est en général à la hauteur du terrain naturel, à moins qu'ils n'aient un couronnement qui permet d'éviter les projections de paquets de mer en arrière de l'ouvrage.

Brise-lames

Les brise-lames sont des dispositifs orientés parallèlement au trait de côte (ouvrages longitudinaux), mais non rattachés à celui-ci, conçus pour diminuer l'énergie de la houle incidente en créant un déferlement en amont du trait de côte.

Cette perte d'énergie en arrière de l'ouvrage permet aux sédiments en transit de s'accumuler, créant parfois un tombolo artificiel. Les matériaux de construction sont variables, allant d'une structure « à talus » (présence d'un cœur d'ouvrage) avec carapace en enrochements jusqu'aux caissons bétonnés posés directement sur le fond.

Epis

Les épis sont des dispositifs placés sur l'estran, de manière transversale par rapport au trait de côte ayant comme objectif le maintien du trait de côte. Ils jouent un rôle de barrière plus ou moins perméable, capable de piéger une partie des sédiments en transit. Ces sédiments forment alors généralement une accumulation en amont de l'ouvrage (dans le sens du transit sédimentaire) et une érosion en aval. L'accumulation peut permettre de lutter contre l'abaissement topographique de la plage

Les méthodes de protection « douces »

Les « méthodes douces » ne s'opposent pas nécessairement aux facteurs de forçage mais composent avec eux. Elles permettent de lutter contre l'érosion des plages et de contribuer à la lutte contre les submersions marines. Parmi elles, le rechargement de plage et le confortement dunaire sont les plus fréquents.

Rechargement de plage

Le rechargement de plage est une technique consistant à apporter des sédiments de manière à remonter le niveau topographique de la plage pour protéger l'arrière-côte.

Confortement dunaire

Le confortement dunaire permet d'engraisser ou de stabiliser un cordon dunaire, au moyen de revégétalisation, reprofilage topographique, implantation de ganivelles (permettant de piéger le sable éolien).

Le confortement de falaise

La problématique d'érosion de falaise ne concerne pas uniquement les facteurs de forçage marins.

L'action continentale est bien souvent tout aussi importante voire prédominante dans cette problématique. Cependant, différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour lutter contre cette érosion : opérations de drainage de falaise, mise en place de grillages, projection de matériaux type béton, protection du pied de falaise (par des enrochements par exemple)...

2.3 - Phénomènes météo-marins

2.3.1 - Le niveau marin

2.3.1.a - Le niveau moyen de la mer

Le niveau moyen de la mer en un point est obtenu par une moyenne d'une série d'observations du niveau de la mer, échantillonnées selon un pas de temps court devant le phénomène de marée (par exemple, pas de temps d'une heure).

À court ou moyen terme, le niveau moyen peut être considéré comme une grandeur constante caractéristique d'un lieu. Cependant, ce niveau suit des variations séculaires, actuellement en période d'élévation. L'accélération observée de cette élévation est liée au changement climatique.

2.3.1.b - La marée théorique

La marée théorique est un phénomène déterministe : il s'agit de la partie prédictible des variations du niveau de la mer, dont la composante principale est la marée astronomique liée à l'action gravitationnelle des astres (Lune et Soleil essentiellement). La marée théorique inclut également la marée dite radiationnelle, correspondant aux variations d'origine atmosphérique prédictibles (dilatations diurnes et nocturnes, variations saisonnières...).

En termes de vocabulaire, le niveau des plus hautes mers astronomiques correspond au niveau maximum susceptible d'être atteint par la marée théorique. Ce niveau est également appelé niveau de pleine mer astronomique maximale ou niveau de pleine mer de vive-eau exceptionnelle (coefficient 120).

2.3.1.c - Les surcotes / décotes

De manière générale, la surcote ou décote instantanée est définie comme la différence à un instant donné entre le niveau de la mer observé et le niveau de marée prédit. Ces différences sont principalement d'origine météorologique, liées notamment aux passages des dépressions atmosphériques ou à la présence d'anticyclones.

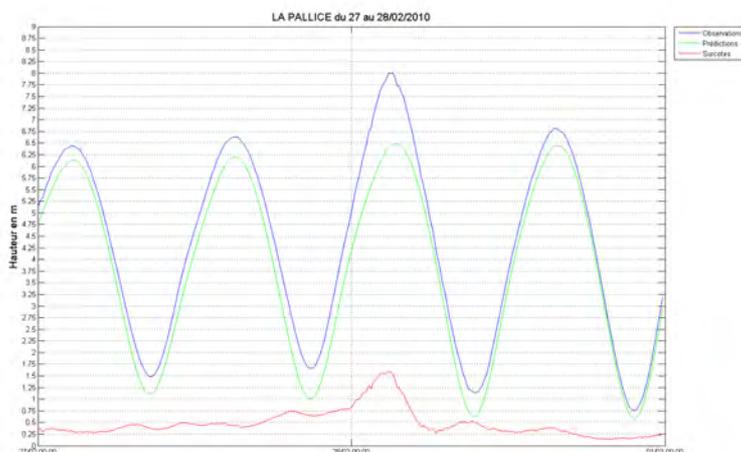


Illustration 1 : Enregistrements marégraphiques à La Rochelle - La Pallice en TU (Source : SHOM)

La variation de niveau est ainsi induite par : l'effet barométrique inverse (environ + 1 cm pour - 1 hPa), par l'action du vent sur la surface de la mer, contribuant à élever ou abaisser le plan d'eau, et par la vitesse de déplacement de la perturbation.

Pour l'étude des niveaux extrêmes, plutôt que la surcote instantanée, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) utilise de préférence la notion de surcote de pleine mer, définie comme l'écart entre le niveau maximum observé et le niveau de pleine mer prédit, même si ces deux niveaux ne sont pas atteints au même instant.

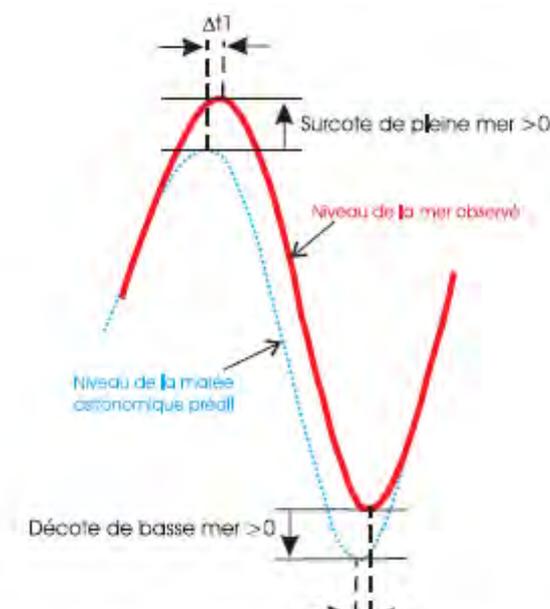


Illustration 2 : Surcote de PM (Source : SHOM)

2.3.2 - Les effets hydrodynamiques et météorologiques locaux

2.3.2.a - Le déferlement des vagues

Lorsque la profondeur d'eau est de l'ordre de grandeur de la hauteur de la vague, le rapport entre la hauteur de la vague et sa longueur d'onde cambre la vague, la rendant instable : elle déferle. Le déferlement est un phénomène dissipatif de l'énergie des vagues qui peut prendre différentes formes (déferlement glissant, plongeant ou frontal) en fonction des caractéristiques morphologiques et bathymétriques. Le déferlement provoque ainsi localement une surélévation moyenne sur un certain pas de temps du plan d'eau, appelée set-up. L'énergie est finalement dissipée sur le littoral par le mouvement de va-et-vient des vagues ou swash. La hauteur maximale atteinte par une vague sur une pente, qu'il s'agisse d'une plage ou d'un ouvrage, est alors appelée le run-up, composé du set-up et du jet de rive – ou moitié du swash.

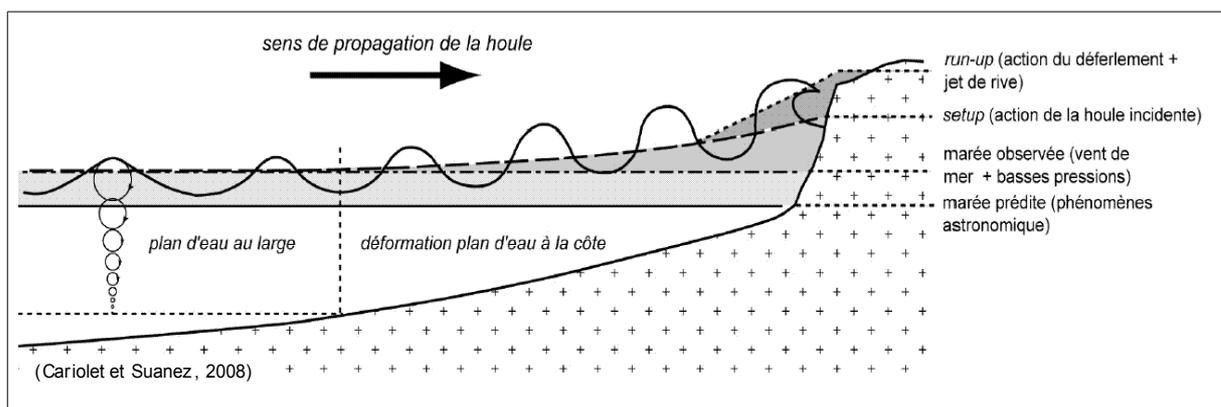


Illustration 3 : Paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes

2.3.2.b - Les seiches

Les seiches sont des oscillations stationnaires de période longue (de 30 secondes à quelques heures), se produisant dans les baies ou les ports. Elles correspondent à un phénomène de résonance entretenu par l'arrivée d'ondes longues engendrées par les variations de pression atmosphérique, ou liées aux trains de vagues.

2.3.3 - Les tsunamis

Ce phénomène correspond à un envahissement exceptionnel du rivage par la mer, sous la forme d'une ou plusieurs vagues de taille très importante. Un tsunami, qui est un terme japonais, est provoqué par une action mécanique brutale et de grande ampleur au niveau d'un lac, d'une mer ou d'un océan. Il peut être généré par mouvement sismique, un glissement de terrain sous-marin, une explosion volcanique ou même par une chute de météorite.

Il s'agit d'une onde dont la longueur d'onde est bien supérieure à celle de la houle et caractérisée par une grande célérité en eau profonde. En eau peu profonde, la vitesse de propagation est réduite tandis que la hauteur des vagues augmente. L'énergie transportée est bien plus importante que dans le cas de la houle et peut engendrer d'énormes dégâts sur les infrastructures et causer la perte de vies humaines.

2.3.4 - Le changement climatique

Le changement climatique se traduit au niveau global par une accélération de l'élévation du niveau moyen de la mer liée notamment à la dilatation et à l'augmentation des masses d'eau (fonte des glaciers, calottes glacières...). La montée de la mer et les modifications associées à ce changement du niveau des eaux (modifications des courants de marée et de l'orientation des houles ainsi que les échanges sédimentaires) vont refaçonner les côtes et en conséquence modifier les profils de plage et le trait de côte ou les modes de submersions. Aujourd'hui des scénarios globaux, issus des travaux de la communauté scientifique internationale, de montée du niveau de la mer sont connus, mais il n'existe pas de scénario régionalisé sur les différentes mers du globe. A ce jour, il s'agit des seules données d'entrée disponibles pour appréhender les changements morphologiques des côtes.

Nonobstant les manifestations dès à présent observables du changement climatique, et en cohérence avec le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) et à la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (MEDDTL, 2012), il convient d'intégrer l'impact prévisible du changement climatique sur le niveau moyen des mers dans la politique de gestion des aléas littoraux. Il est ainsi recommandé d'identifier dès à présent les impacts du changement climatique et leurs effets sur les zones d'aléa. Un horizon de 100 ans est pertinent au regard de l'échelle temporelle en matière d'urbanisme.

La prise en compte du changement climatique pour l'aléa submersion marine doit se faire dès lors que des échéances futures sont étudiées. Le choix des valeurs d'élévation du niveau moyen de la mer peut se référer au « scénario pessimiste » de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC, 2010 ; ONERC, 2012), soit actuellement une élévation de 0,60 m du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100. En fonction de l'évolution des connaissances, des recommandations nouvelles pourront ultérieurement modifier ces valeurs.

2.4 - Aléas littoraux

Les aléas littoraux sont des aléas d'origine météorologique. Les principaux aléas traités dans le cadre de ce document sont :

- le recul du trait de côte,
- la migration dunaire,
- la submersion marine.

Les tsunamis ne sont pas d'origine météorologique, ils sont liés à des séismes, à des éruptions sous-marines ou à des mouvements de terrain. Leurs caractéristiques et leur propagation sont très différentes des tempêtes et cyclones. Le présent guide ne couvre donc pas les tsunamis.

2.4.1 - Le recul du trait de côte

Le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. Généralement, c'est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, érosion naturelle induite par les forces marines, combinée parfois à des actions continentales, ou d'une érosion générée ou accélérée par l'homme (sur-fréquentation, extraction, aménagements et ouvrages de protection, urbanisation proche du littoral entraînant des ruissellements de surface et la présence de réseaux, etc.).

Les côtes basses meubles ainsi que les côtes à falaises peuvent reculer. Les côtes basses meubles se caractérisent cependant par une mobilité permanente donnant au trait de côte une géométrie variable, pouvant se caractériser par des phases d'avancée et de recul. Les côtes à falaises ne peuvent que reculer. Leur recul est souvent plus complexe à appréhender du fait de la combinaison des actions continentales (infiltration, ruissellement...) en haut de falaise et des actions directes de la mer.



Illustration 4 : Recul du trait de côte dans le sud Finistère (Photo : DDTM 29 - UPR)

Le recul du trait de côte, tel qu'il est défini dans ce guide, correspond à une évolution sur le long terme du trait de côte, observable à des échelles de plusieurs décennies, consécutive à une tendance à l'érosion. L'érosion peut aussi être observée de manière ponctuelle après un événement tempétueux.

2.4.2 - La migration dunaire

La migration dunaire est le mouvement, vers l'intérieur des terres, de dunes mobiles non stabilisées par la végétation. Ces mouvements sont souvent associés à des dunes libres, dites transgressives, qui reculent vers l'intérieur des terres par progression de leur versant interne, appelé versant d'ensevelissement. Les grandes phases d'avancées dunaires caractérisant entre autre la côte d'Aquitaine ou la côte d'Opale ont été, dès la fin du 19^{ème} siècle, maîtrisées par une politique active de plantation. Actuellement, bien que peu fréquents le long du littoral français, ces phénomènes peuvent menacer des habitations, des voies de communication ou des cultures, comme c'est le cas actuellement sur la rive nord de l'estuaire de l'Authie dans le Pas-de-Calais (cf. Illustration 5).



Illustration 5 : Versant d'ensevelissement, rive nord de la baie d'Authie (80) (Photo : M-H Ruz)

Ces phénomènes se rencontrent habituellement le long de côtes exposées à de forts vents de mer et où le volume de sable disponible est important. Ils peuvent être initiés par l'érosion marine d'un versant dunaire en falaise sableuse, à partir de laquelle, sous l'effet de la déflation éolienne (érosion par le vent), se mettent en place des dunes de sommet de falaise (dunes perchées) qui progressivement migrent vers l'intérieur des terres. La déstabilisation du couvert végétal, qu'elle soit d'origine naturelle (sécheresse, feux, animaux rongeurs...) ou anthropique (piétinement, véhicules...) peut également entraîner la formation de couloirs de déflation (siffle-vent) ou de cuvettes de déflation (caoudeyres) qui, en cas de dynamique éolienne active peuvent aboutir à la formation d'une dune parabolique dont la progression vers l'intérieur des terres entraîne l'ensevelissement progressif des terrains adjacents.

Les migrations dunaires se caractérisent, en règle générale, par des évolutions morphologiques et des processus plus lents que pour les autres aléas littoraux, et par leurs effets spatiaux plus circonscrits. Cependant, les volumes de sable remaniés sont parfois considérables et peuvent menacer les biens (ensablement de construction), voire la sécurité des personnes lorsque la progression des dunes s'accompagne « d'avalanches dunaires ».

2.4.3 - La submersion marine

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours.

Trois modes de submersion marine sont distingués :

- submersion par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel (cf. Illustration 6),
- submersion par franchissements de paquets de mer liés aux vagues, lorsque après déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel (cf. Illustration 7),
- submersion par rupture du système de protection, lorsque les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin : défaillance d'un ouvrage de protection ou formation de brèche dans un cordon naturel (cf. 8), suite à l'attaque de la houle (énergie libérée lors du déferlement), au mauvais entretien d'un ouvrage, à une érosion chronique intensive, au phénomène de surverse, à un déséquilibre sédimentaire du cordon naturel, etc.



*Illustration 6 : Submersion par débordement à Leucate le 17 décembre 1997 (11)
(Photo DREAL Languedoc-Roussillon)*



*Illustration 7 : Submersions par franchissement par paquets de mer à Malo-les-Bains (59)
le 10 février 2009 (Photo : Jean-Jacques Vynck) et à Ault (80) le 16 mars 1914
(Source : Conseil Général de la Somme)*



*Illustration 8 : Brèches dans le cordon dunaire de la Dune d'Aval à Wissant (62) le 26 février 1990
(Photo : Olivier Beaulieu)
et dans une digue de l'estuaire de la Gironde (Photo : groupe Géotechnique, Risques et Bâtiments du LRPC
de Bordeaux – 4 mars 2010)*

D'autres aléas accompagnent la submersion marine. Il s'agit principalement des effets de dissipation d'énergie des phénomènes marins induisant des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents.

Le choc des vagues peut ainsi être considéré comme un aléa à part entière. Son impact est distinct d'une inondation et est lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures (cf. Illustration 9).



Illustration 9 : Effets des chocs de vagues à Fouras (17) lors de la tempête Xynthia (Source : ARTELIA)

L'arrivée brutale des eaux à terre peut elle aussi être génératrice de choc violent. Elle peut être engendrée par une surverse ou une rupture d'ouvrage. Ce phénomène est particulièrement rencontré :

- en arrière immédiat des ouvrages de protection contre les submersions,
- au-delà de celles-ci dans les zones d'écoulement préférentiel.

3 - Méthode d'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

3.1 - Une méthode d'analyse des aléas littoraux en deux temps

L'analyse des phénomènes naturels et de leurs conséquences physiques possibles, c'est-à-dire la caractérisation des aléas littoraux, qui se traduit par une ou plusieurs cartes d'aléas, se déroule selon deux phases (cf. Illustration 10) :

- l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral,
- la caractérisation et la cartographie des aléas .

L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral est une phase préalable aux analyses des différents aléas. Elle n'a pas pour objectif de traiter chaque aléa mais de comprendre le fonctionnement de la zone étudiée, de décrire les phénomènes qui l'affectent et de confirmer le périmètre d'étude à retenir. Selon le type d'informations, cette analyse est effectuée à des échelles comprises entre le 1/100 000^e et le 1/10 000^e, ou à des échelles plus grandes si nécessaire. Elle permet une bonne compréhension du fonctionnement du site qui permettra de déterminer l'origine des aléas et de choisir les bonnes hypothèses lors de la caractérisation des aléas et, pour l'aléa submersion marine, la méthode la mieux adaptée. Elle s'appuie principalement sur l'exploitation de la bibliographie existante et des données disponibles ainsi que sur des observations de terrain mais peut demander des analyses spécifiques (instrumentation, modélisation, dires d'expert, etc.). Elle comprend les étapes suivantes :

- la description hydro-morphosédimentaire du site : elle a pour objectif d'analyser les transports sédimentaires et les évolutions du littoral qui en résultent, les évolutions de la position du trait de côte et de la morphologie de la frange littorale. Elle s'appuie sur :
 - l'analyse du cadre géomorphologique : types de côtes, caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et morpho-sédimentaires,
 - les conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques associées (niveaux marins, houles, etc.),
 - le fonctionnement hydro-sédimentaire : analyse des transits sédimentaires,
 - les ouvrages de protection et les systèmes de protection contre les inondations,
 - l'analyse du fonctionnement hydraulique du site,
- l'approche historique : plusieurs points sont analysés lors de cette phase : l'évolution de la position du trait de côte et de la morphologie de la frange littorale, les événements historiques de submersions marines, l'évolution de l'occupation humaine et de l'implantation des ouvrages de protection. Une analyse chronologique de ces différents points permet d'apporter des éléments de compréhension complémentaires à l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire.

À l'issue de ces 2 étapes, une synthèse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral, analysant les principaux facteurs à l'origine des aléas littoraux, est à réaliser. Elle rassemble les principales informations qui permettront de faire les bonnes hypothèses et de choisir les bonnes méthodes d'analyse conduisant à la caractérisation des aléas. C'est uniquement lors de cette synthèse que le périmètre du bassin d'étude des aléas est définitivement arrêté.

La caractérisation et la cartographie des aléas, deuxième phase de l'étude d'aléa, a pour objectif de déterminer les aléas, c'est-à-dire d'identifier les secteurs concernés par les différents aléas et de connaître leurs niveaux. Elle se décompose en trois étapes :

- Étape 1 : choix des valeurs de référence de l'aléa considéré et détermination des incertitudes associées :
 - pour le recul du trait de côte, détermination du taux de recul moyen annuel, et/ou la tendance linéaire sur une période à évolution homogène représentative, et d'un recul brutal lié à un événement majeur,
 - pour la migration dunaire, détermination du taux de migration moyen annuel et d'une migration brutale vers l'intérieur des terres liée à un événement majeur,
 - pour la submersion marine,
 - choix de l'intensité du (ou des) événement(s) de référence : par exemple, dans le cas d'un PPRL, un événement historique majeur, s'il est supérieur à un événement de période de retour 100 ans, ou, par défaut, un événement centennal,
 - choix des hypothèses de prise en compte des systèmes de protection composés d'ouvrages de protection et/ou de structures naturelles ; le choix des hypothèses de prise en compte des structures naturelles étant directement en lien avec l'analyse des évolutions du littoral.
 - Étape 2 : caractérisation de l'aléa : cette étape vise à définir l'extension géographique et les caractéristiques de l'aléa (par exemple hauteur, vitesse d'écoulement, vitesse de montée des eaux pour la submersion marine en considérant les valeurs de référence retenues et les méthodes appropriées).
 - Étape 3 : qualification de l'aléa (modéré, fort...) selon ses caractéristiques.

Cette deuxième phase, dont les principes de cartographie sont spécifiques aux objectifs de chaque étude, n'est pas abordée dans ce document. Le guide méthodologique PPRL (MEDDE/DGPR, 2014) décrit la méthodologie de réalisation des cartographies préalables à l'élaboration des PPRL.

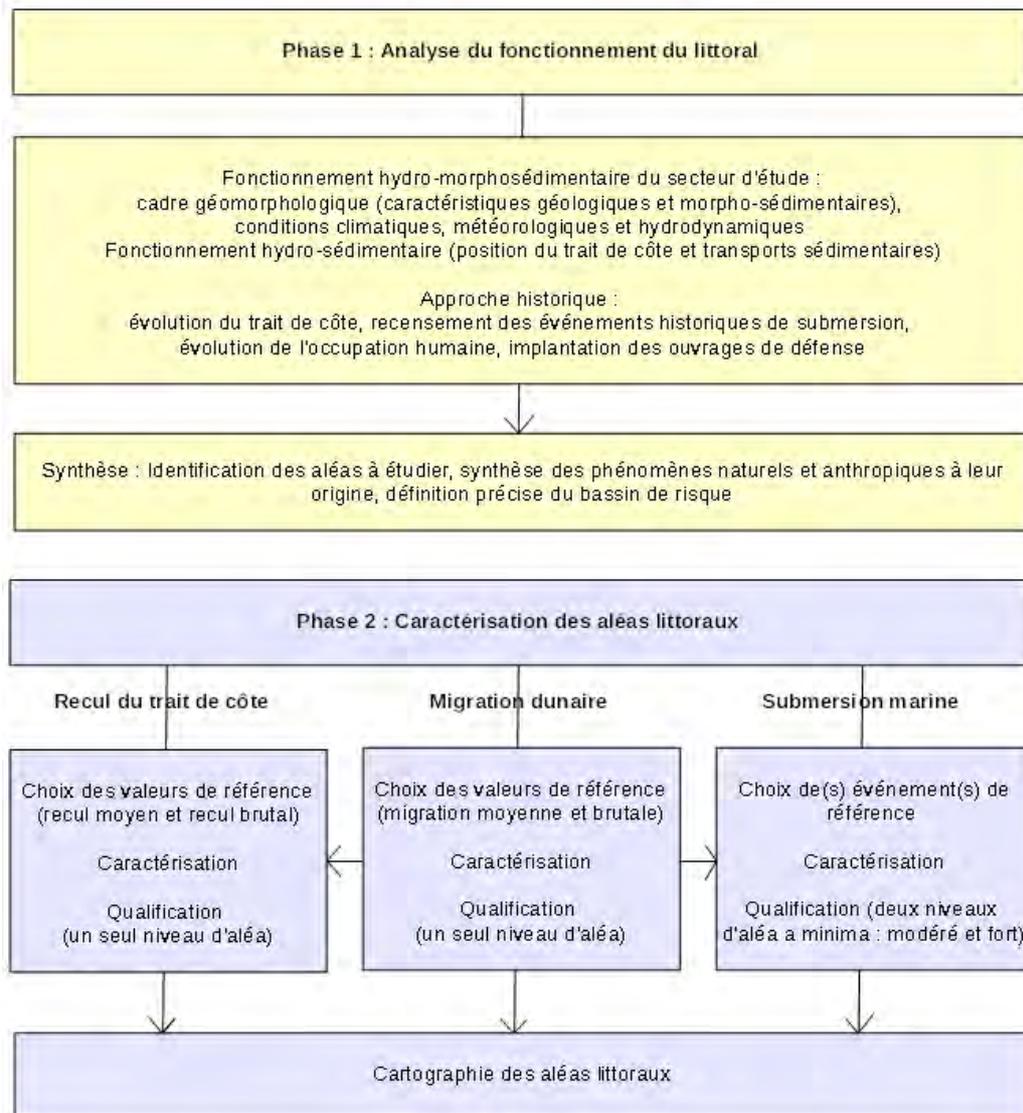


Illustration 10 : Démarche de l'étude des aléas littoraux

Cette démarche de l'étude en deux phases concerne l'ensemble des études d'aléas littoraux. Ce document développe la méthodologie de la première phase, l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral. Le passage entre les phases 1 et 2 doit être marqué par un point d'arrêt validant les choix faits à la lumière des premiers résultats (aléas à étudier, méthodologies de caractérisation des aléas, phénomènes naturels à prendre en compte...). Le choix des méthodes de caractérisation des aléas ne peut en effet être complètement défini sans une analyse du fonctionnement du site.

3.2 - Principes généraux du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

Le littoral est un espace particulier, à l'interface de la lithosphère (sol), de l'atmosphère (air) et de l'hydrosphère (eau). Il est, par ailleurs, plus ou moins anthropisé (action de l'homme). Par conséquent, les influences qui s'y manifestent sont de type :

- continentales : caractéristiques des structures géologiques et géomorphologiques et des masses d'eau continentales ;
- marines : vagues, appelées aussi états de mer, marée, et courants associés, variations du niveau moyen de la mer, surcotes météorologiques... ;
- atmosphériques : éléments physiques tels que le vent, la pression, la température, l'eau sous toutes ses formes, contribuant d'une part, à l'érosion des roches et à la mobilité des sédiments du littoral et de l'intérieur des terres et, d'autre part, à la modification des phénomènes marins ;
- anthropiques : actions d'aménagement susceptibles d'influencer intentionnellement ou non la dynamique du rivage (réalisation d'ouvrages et d'infrastructures par exemple). Ces actions sont destinées soit à la défense des biens et des personnes contre les éléments naturels, soit à l'exercice d'activités économiques, dont les activités touristiques.

En raison de ces influences multiples, les caractéristiques des agents météo-marins, la position du rivage et la morphologie côtière fluctuent aux différentes échelles de temps et d'espace. Une bonne connaissance des interactions entre les formes littorales et les facteurs dynamiques est le préalable, d'une part, à une gestion cohérente et durable des milieux fragiles et mobiles que sont les littoraux, et d'autre part, à la connaissance des aléas littoraux induits : recul du trait de côte, submersion marine, migration dunaire.

Certains principes sont fondamentaux pour l'analyse du fonctionnement général des littoraux : le principe de non-linéarité des évolutions, le principe d'emboîtement des échelles d'espace et de temps, le principe d'interaction.

Le principe de non-linéarité des évolutions⁴ : La dynamique des rivages comme les inondations par la mer résulte souvent de facteurs et de processus qui se succèdent et se combinent. En raison de l'ajustement entre les formes littorales et les processus hydrodynamiques, le fonctionnement des littoraux est fondamentalement non linéaire dans le temps et l'espace. Ainsi, les formes d'accumulation sont affectées par une mobilité temporelle et spatiale intrinsèque qualifiée de « respiration » ou de « degré de liberté » de la forme. On parle ainsi « d'espace de liberté du littoral ». Cette variabilité spatiale observée sur le temps court ne doit pas être confondue avec la tendance évolutive à long terme. C'est la raison pour laquelle l'analyse de la dynamique littorale pour l'étude des aléas doit être appréhendée sur le temps long (échelle historique) pour compléter les éléments de connaissance apportés par l'analyse du fonctionnement à court terme du littoral impacté par une tempête.

Le principe d'emboîtement des échelles d'espace et de temps : Le fonctionnement du littoral nécessite d'être appréhendé en considérant les phénomènes naturels, et non en fonction des limites administratives. Il s'agit de replacer le site d'étude dans son bassin de risque et au sein de la cellule/unité hydro-sédimentaire (cf. 3.3.3). Cette approche nécessite d'emboîter, d'une part, les échelles spatiales, le site d'étude, replacé dans un contexte géographique large, et d'autre part, les

⁴ Pour plus de précisions, consulter l'ouvrage « La gestion du trait de côte », Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 2010, Ed. Quae.

échelles temporelles, depuis l'événement instantané (la tempête) jusqu'à la dynamique historique : les tendances évolutives se définissent à la lumière d'une étude sur le temps le plus long possible.

Le principe d'interaction : Chaque élément constitutif du milieu peut agir sur l'état des autres de façon directe, instantanée ou différée. Le système littoral est à considérer dans son ensemble : relations pour les côtes sableuses entre la plage et les fonds sous-marins (échanges sédimentaires qui peuvent influencer également la position du trait de côte), forte interdépendance en milieu tropical entre la plage et le récif corallien qui l'alimente en sédiments, protection du pied de falaise contre l'action des vagues assurée par les débris provenant du recul des falaises... Il existe également une interaction très forte entre la vulnérabilité du littoral à la submersion marine et la morphologie du littoral qui peut, suivant l'état du stock sédimentaire, protéger ou non les zones basses.

3.3 - Fonctionnement hydro-morphosédimentaire du secteur d'étude

3.3.1 - Analyse du cadre géomorphologique

La définition géomorphologique du secteur d'étude conduit à préciser le type de côte considéré, les caractéristiques géologiques et sédimentologiques du littoral, sa morphologie et son orientation. On distingue deux grands types de côte :

- les côtes de relief, rocheuses ou à falaise (ou côtes d'érosion) : l'élaboration de côtes rocheuses et de côtes à falaises, parfois associées à des plates-formes d'érosion marine (platier ou estran rocheux), est permise par un contact direct à la mer. Ces côtes, dites d'ablation ou d'érosion, ne peuvent que reculer (leur érosion est continue mais leur recul se fait par à-coups). Cette dynamique régressive, induite par l'action combinée de la mer et de processus continentaux (ruissellement, infiltration, gel/dégel, appel au vide...) sera d'autant plus rapide que les matériaux rocheux constituant l'abrupt seront peu résistants mécaniquement et les actions fortes.
- les côtes d'accumulation, constituées de matériaux meubles : principalement d'origine minérale, ces sédiments (des vases aux blocs) sont le produit de la désagrégation des roches avant tout ; la part biogène (activité d'organismes vivants) est très souvent secondaire. Ces côtes d'accumulation se répartissent principalement le long de reliefs à faible pente, mais s'adossent parfois à des côtes rocheuses. Ces formes, mobiles, peuvent subir alternativement des phases d'accumulation, ou d'accrétion, et de démaigrissement, ou d'érosion. Dans cette catégorie de côte sont classés : les plages de sables ou de galets, souvent associées à des cordons, les estuaires, les lagunes, les deltas, les marais maritimes, les mangroves, les systèmes coralliens, etc.

3.3.1.a - Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques

L'analyse du secteur d'étude doit faire apparaître la nature géologique des espaces : côtes rocheuses, anciens marais maritimes, vasières, falaises meubles, cordons dunaires, etc. Elle doit également comprendre une description simplifiée de l'histoire géologique du secteur considéré. Une analyse géologique et hydrogéologique approfondie doit être menée dans un objectif de détermination de l'évolution du trait de côte sur une côte à falaises (cf. Encart 2).

Les informations sur les éventuels mouvements verticaux terrestres (surrection et subsidence) sont utiles. Ces mouvements, millimétriques à l'année, peuvent être non négligeables sur le long terme. Il peut être nécessaire de les prendre en compte dans les baies et les environnements estuariens, au même titre que les évolutions à long terme du niveau marin pour la caractérisation de l'aléa submersion marine.

Encart 2 : Approche géologique des falaises : facteurs d'instabilité et types de mouvements

Il est nécessaire, en présence de falaises, de préciser spatialement à l'échelle du site d'étude certaines informations géologiques :

- La pétrologie et la lithologie définissent la mise en place, le type et la résistance des roches affleurantes. Les différentes roches ont des sensibilités variées aux agents et processus d'érosion marins ou continentaux.

- La stratigraphie précise la répartition des roches les unes par rapport aux autres. La superposition de deux roches dites cohérentes mais de résistances différentes peut provoquer des érosions différentielles.

- La tectonique met en évidence les fractures en grand (failles) ainsi que les phénomènes de déformation souple. Ces fractures peuvent influencer les circulations d'eau superficielles ou internes et mettre à l'affleurement des étages géologiques différemment sensibles à l'érosion.

Des analyses géotechniques des reliefs rocheux peuvent parfois s'avérer nécessaires. Elles ont pour but d'identifier les facteurs d'instabilité et de caractériser les phénomènes ponctuels. Leur étude et leur cartographie nécessitent d'exploiter principalement les données historiques, les indices géomorphologiques et les dommages aux ouvrages, selon des techniques propres à l'élaboration des PPR mouvements de terrain (*Guide méthodologique PPR Mouvements de terrain*, MATE/METL, 1999). La méthode classique, actuellement appliquée par la plupart des bureaux d'études ou organismes chargés d'évaluer l'aléa éboulement, comporte deux étapes : une étude de terrain de la surface supérieure (plateau), puis une étude directe de la paroi.

Dans certains cas, il peut être nécessaire de procéder à une analyse de la géométrie tridimensionnelle des compartiments rocheux instables (limites externes et fracturation interne) (cf. Illustration 11). Il s'agit dans ces cas d'observer les plans de schistosité, de stratification, les diaclases et failles, les fractures de décohérence, joints de retrait, les indices de mouvement, les trajectoires d'effondrement ou de glissement et d'emprise spatiale lors de la présence d'enjeux à proximité des versants côtiers. Ces différentes informations sont souvent essentielles pour déterminer la forme, le volume, les modalités, voire la fréquence des mouvements.

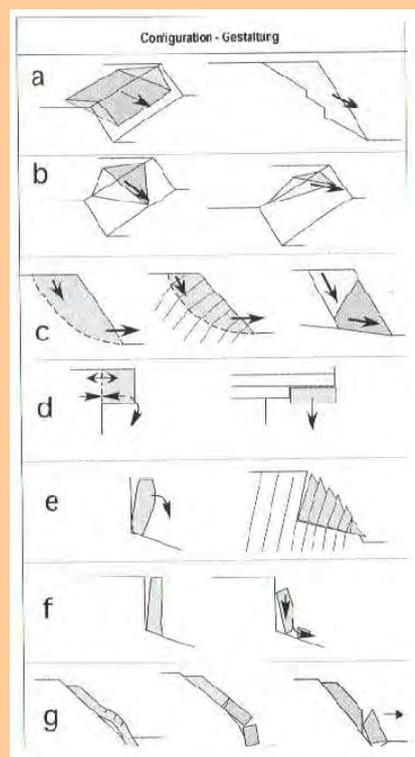


Illustration 11 : Représentation schématique des différents mécanismes générant des instabilités de versants côtiers et de falaises.

a : glissement plan ; b : glissement dièdre ; c : glissement rotationnel et fractionné ; d : rupture de surplomb ; e : basculement de colonne ou de blocs ; f : rupture de colonne en pied ; g : rupture de banc.

(Jaboyedoff et al., 2001, in Karere et al., « Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises »).

3.3.1.b - Les caractéristiques sédimentologiques des plages

Il est utile de définir les caractéristiques sédimentologiques des plages et des cordons de sables ou de galets du secteur d'étude. La nature et la répartition des sédiments en présence dépendent de leur disponibilité dans l'environnement géologique local ou régional, de l'héritage géologique récent et des forçages dynamiques. Il est utile de préciser leur origine. Leurs caractéristiques granulométriques résultent directement des agents dynamiques (vents) et hydrodynamiques (houle, marée et courants associés), de la nature des matériaux et du temps de façonnage par les agents, la granulométrie des sédiments mobilisables étant par ailleurs en équilibre avec les forçages dynamiques. Ces informations sont précieuses pour définir les agents responsables des transports sédimentaires et pour établir le sens et l'intensité de ces déplacements (cf. les transports sédimentaires sous l'action des houles et des marées 3.3.3). Ce travail peut aboutir à la définition des limites (longitudinales et transversales) de la cellule hydro-sédimentaire dans laquelle s'insère le site d'étude (cf. la cellule hydrosédimentaire 3.3.3) et de son mode de fonctionnement.

3.3.1.c - Les caractéristiques topo-bathymétriques

La caractérisation de la topographie et de la bathymétrie du secteur d'étude est fondamentale. Les données utilisées doivent être les plus précises possibles. L'ensemble des données bathymétriques et topographiques, même anciennes, disponibles sont à recenser et à analyser. L'acquisition de données topo-bathymétriques fines supplémentaires est parfois nécessaire (cf. Encart3). Ces besoins d'acquisition doivent être identifiés le plus tôt possible.

Encart 3 : Les besoins en données topo-bathymétriques pour une étude d'aléas littoraux

Les données topographiques :

A défaut de levés topographiques à grande échelle disponibles sur la zone d'étude, on recourt le plus souvent aux données de l'Institut Géographique National, commercialisées sous forme de cartes et à des bases de données « BD ALTI® » et « BD TOPO® ». Cette dernière, issue de la numérisation des courbes de niveau de la carte topographique de la France à l'échelle de 1/25 000, permet la réalisation de modèles numériques de terrain (MNT) avec un pas de maille pouvant atteindre 25 m. Cependant, la précision altimétrique annoncée est de l'ordre du mètre sur les points cotés et de 2 à 3 m sur les courbes de niveau. Ces données peuvent être utilisées dans le cadre de l'analyse du fonctionnement du littoral mais sont très insuffisantes pour l'analyse des aléas.

Quels que soient les méthodes et outils retenus, une certaine finesse des données topographiques est nécessaire pour la caractérisation des aléas, en particulier l'aléa submersion marine. Les résultats produits dépendent en effet fortement de la qualité de ces données. En particulier, la mise en œuvre de modèles numériques n'aurait pas d'intérêt sans des données topographiques de résolution et de précision suffisantes. Compte tenu du rôle joué par la micro-topographie (limitations d'extension des eaux par un talus de hauteur décimétrique, effets déversoir, cuvette où les hauteurs d'eau peuvent être importantes...), il convient de privilégier les données de type Lidar (laser aéroporté) lorsqu'elles existent. De précision altimétrique inférieure à 20 cm, elles correspondent bien au besoin.

Lorsque des données Lidar ne sont pas disponibles, il est recommandé d'effectuer des levés complémentaires, par exemple à l'aide de dGPS, afin de disposer de MNT dont la précision est celle attendue des niveaux d'aléas du PPR. Lors de ces levés complémentaires, une attention particulière sera apportée sur les points suivants : principaux obstacles à l'écoulement (crêtes des obstacles et des principales ruptures de pente), ouvrages de protection y compris digues de second rang, structures naturelles, remblais d'infrastructures, zones urbanisées.

La réalisation de la partie topographique de Litto3D, par plusieurs campagnes Lidar, a été programmée par le MEDDTL/DGPR (cf. Illustration 12).



Illustration 12 : Couverture en données topographiques Lidar en 2013 (d'après l'IGN), dont levés réalisés dans le cadre du projet Litto3D

Les données bathymétriques :

Des données bathymétriques sont nécessaires pour l'analyse des phénomènes marins. Dans le cadre des études préalables aux PPRL, il s'agit principalement de l'analyse des franchissements par paquets de mer et de l'estimation de la surcote liée à la houle et de son impact sur le niveau marin.

Pour l'étude des franchissements, dans le cadre de la caractérisation de l'aléa submersion marine, des données bathymétriques fines sont nécessaires afin de connaître les caractéristiques de la houle à la côte. Le principal fournisseur de données bathymétriques est le SHOM. De nombreux points de sonde sont disponibles. Leur précision est adaptée au besoin mais leur résolution n'est souvent pas suffisante, notamment dans les petits fonds. Il convient cependant de s'assurer de l'ensemble des données disponibles sur le portail du Réseau européen d'observations et de données maritimes⁵ avant de faire éventuellement des levés complémentaires entre -10 m et 0 m CM.

Les petits fonds sableux sont souvent mobiles et des tests de sensibilité peuvent être nécessaires afin de déterminer le profil saisonnier le plus défavorable en termes de propagation de houles et

5 www.emodnet-hydrography.eu

de franchissements. Les évolutions saisonnières des petits fonds, et en particulier des barres d'avant-plage dont certaines s'effacent en hiver et se reconstituent en été, sont à considérer. Une hypothèse de profil de type fin d'hiver, pour lequel les houles à la côte seront plus importantes, est à privilégier.

L'impact de l'évolution des bancs de sable est encore au stade de recherche et est pour l'instant difficile à étudier dans le cadre d'un PPRL. Ces bancs pourront être considérés comme invariants ou supprimés.

Lors de la description de l'événement naturel de référence pour la caractérisation de la submersion marine, les mêmes principes s'appliquent pour l'estimation de la surcote liée à la houle. Dès que cette composante est importante dans le niveau marin, il est conseillé de mettre en œuvre une modélisation numérique qui nécessite une bathymétrie fine.

3.3.1.d - Caractéristiques morpho-sédimentaires et bathymétriques des fonds et de l'estran

La configuration et la morphologie des littoraux sont liées à l'exposition des formes aux processus dynamiques produits par les phénomènes naturels. Aussi, le fait que les plages, les cordons naturels ou les falaises soient en position d'abri ou au contraire battus par les vagues est une information déterminante, car ce paramètre influe fortement sur la rapidité des évolutions.

Des fonds profonds, dénués d'obstacles, permettent aux houles d'atteindre la côte avec une énergie maximale. La présence d'îles, d'archipels, de hauts-fonds ou de récifs coralliens au large des côtes étudiées peut réduire l'énergie des vagues à la côte et donc les risques d'érosion et de franchissements par paquets de mer. Cependant, de possibles phénomènes de diffraction ou de réfraction peuvent concentrer l'énergie des houles en certains points du rivage.

Ainsi, les caractéristiques morpho-sédimentaires et l'exposition de la côte conditionnent le rôle des agents hydrodynamiques (houles et marée) et, par conséquent, amplifient ou limitent la sensibilité d'une zone littorale aux agressions hydrodynamiques.

Encart 4 : Analyse du cadre géomorphologique – Données disponibles

Type de côte et configuration : cartes à l'échelle de 1/25 000 de l'IGN, BD Topo® et Alti®, RGE de l'IGN, site internet Géoportail, travaux universitaires, Catalogue sédimentologique des côtes françaises, photographies aériennes verticales et obliques, orthophotographies, Ortholittoral du Géolittoral, etc.

Géologie : cartes géologiques, BD Charm-50 et site internet infoTerre du BRGM, Géoportail, études d'impacts, photographies aériennes issues de missions générales ou spécifiques archivées dans les services de l'État, études géotechniques, etc.

Sédimentologie : Catalogue sédimentologique des côtes françaises, cartes G du SHOM (représentation de la nature des fonds), Base de Données Sédimentologiques du SHOM (BDSS), Géoportail, données IFREMER études d'impacts, travaux universitaires, etc.

Topo-bathymétrie : MNT des BD Topo® et Alti® de l'IGN, Histolitt® (assemblage des bases de données bathymétriques et topographiques) SHOM/IGN, Litto3D® SHOM/IGN, Base de données bathymétriques du SHOM (BDSS), cartes anciennes répertoriées à la Bibliothèque Nationale de France de l'IFREMER (Séries Belin et Neptune), archives départementales, suivis morphologiques de plages (levés de profils de plage, etc), levés lidars, etc.

3.3.2 - Analyse des conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques

La compréhension des aléas littoraux nécessite de déterminer les agents et les processus responsables des dynamiques hydro-sédimentaires. La mobilité des rivages tire ses particularités de la combinaison de processus marins et continentaux. Les processus marins sont à analyser de manière systématique. Cependant, les processus continentaux, intéressant plus particulièrement les côtes rocheuses, ne doivent pas être omis, d'autant que leur manifestation est parfois accentuée en raison de la proximité de la mer.

3.3.2.a - Contexte climatique et météorologique

Les aléas littoraux sont fortement déterminés par les paramètres climatiques. Ces paramètres, qui peuvent être appréhendés à l'échelle d'un événement tempétueux, sont à étudier à l'échelle climatique, sur une normale climatique⁶.

Le vent et la pression atmosphérique sont des paramètres climatiques à étudier. Le vent est un agent de transport très efficace pour les sables (capacité de rechargement dunaire, ou au contraire de fragilisation). Il régit les états de mer (vagues) et l'afflux d'eau à la côte qui s'ajoutent à la surcote barométrique liée à la pression atmosphérique. A une échelle régionalisée et plus spécifiquement du site d'étude, il peut être utile de définir conjointement les fréquences, vitesses et directions du vent (roses des vents de Météo-France établies sur 30 ans), les répartitions moyennes saisonnières pour différentes classes de force de vent. Pour les situations de vents forts et les tempêtes, les grands flux de circulation atmosphérique peuvent être décrits.

Les précipitations (régimes des pluies, précipitations totales annuelles, précipitations maximales par épisode) et les températures (maximales, minimales, répartition saisonnière) sont des paramètres permettant de mieux évaluer les phénomènes de ruissellement, d'infiltration, de rechargement des nappes phréatiques, d'alternance de périodes sèches et humides. Ceux-ci jouent sur les caractéristiques des matériaux en place et donc leur stabilité, à analyser en particulier pour les côtes à falaises et les versants littoraux.

Enfin, des éléments d'information quant au changement climatique attendu, voire observé au travers d'études régionales, sont à apporter. Sur ce point, il sera fait référence aux travaux du GIEC et de l'ONERC.

3.3.2.b - Les conditions hydrodynamiques

Les facteurs hydrodynamiques, que sont le niveau marin, les états de mer et les courants associés, jouent un rôle dans la mobilité des rivages et donc dans l'apparition des aléas induits. Cependant, ces facteurs sont variables d'un point à un autre du littoral et dans le temps. Il est donc nécessaire de les décrire à une échelle régionalisée, puis au niveau du secteur d'étude.

Le niveau marin

Après avoir établi les informations de base sur l'élévation du niveau moyen de la mer, y compris les prévisions d'évolution liées au changement climatique, il s'agit de décrire les caractéristiques marégraphiques à une échelle régionalisée ainsi qu'à l'échelle du site d'étude. De type semi-diurne, ou semi-diurne à inégalité diurne, pour la France métropolitaine, les marées peuvent être d'un autre type dans les Départements et Collectivités d'Outre-Mer. Parmi les informations utiles

⁶ Normale climatique définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). La normale climatique fait intervenir des moyennes calculées sur des périodes de données de 30 ans.

figurent le niveau moyen de la mer, les marnages minimum, moyen et maximum, la direction et la force des courants pour un cycle tidal (Basses Mers/Hautes Mers), pour les vives-eaux et mortes-eaux. Ces informations sont exprimées dans le référentiel hydrographique dont l'origine est le zéro hydrographique et rattachées au système d'altitude légal de la zone (système NGF-IGN69, référence d'altitude du Nivellement Général pour la France continentale ; NG -IGN78 en Corse ; NGG 1977 en Guyane...).

L'ensemble des mesures marégraphiques doit être recensé et collecté (mesures pérennes et temporaires). Elles permettent des exploitations statistiques éventuelles pour la définition des niveaux marins extrêmes et sont utiles lors de l'analyse des événements historiques. Les analyses des niveaux marins extrêmes disponibles, réalisées à partir des mesures marégraphiques, sont également à recenser.

Les états de mer (vagues)

Pour caractériser les états de mer, les informations utiles sont la hauteur, la période et la direction des vagues selon divers types de temps. Les roses des états de mer donnent des informations précieuses sur les houles et mers du vent dominantes par temps calme et lors de forts coups de vent. Les caractéristiques des houles au large sont également essentielles (direction, hauteur, période, longueur d'onde, corrélogramme hauteur et période des vagues). Elles définissent le climat d'état de mer ou d'agitation.

L'ensemble des mesures, et des autres types de données, d'états de mer de la zone doivent être recensées et collectées (mesures pérennes et temporaires). Lorsque des mesures in-situ ne sont pas disponibles, le recours aux données issues de simulations rétrospectives à partir de données de vent peut être nécessaire.

Les spécificités estuariennes

En milieu estuarien, les données hydrologiques doivent être recensées. En effet, les dynamiques maritimes et fluviale s'y combinent. Les niveaux d'eau, la propagation des surcotes et les courants y ont des origines, des forces, des temporalités et des caractéristiques statistiques spécifiques.

Ces caractéristiques sont fonction du type d'estuaire (estuaire de petite ou de grande taille par rapport à la longueur d'onde de la marée, embouchure en forme d'entonnoir, pente du lit fluvial...). Des analyses spécifiques des niveaux d'eau et des états de mer sont nécessaires.

Les spécificités des étangs et lagunes

Le fonctionnement hydraulique spécifique des secteurs arrière-littoraux en eau (étangs, lagunes, marais, etc.) demande une recherche de données spécifiques afin de disposer de données sur chaque secteur de comportement hydraulique homogène.

Des analyses spécifiques sur les clapots pouvant être levés sur les grandes étendues d'eau intérieures peuvent être nécessaires.

Encart 5 : Analyse des conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques – Données disponibles

Données climatiques et météorologiques : Météo-France, sites internet divers tels que le centre européen de climatologie, Wettercentral, NOAA, etc.

Données hydrodynamiques :

Niveaux marins : SHOM référent national, Refmar⁷ (couvre les zones mondiales sous juridiction française et l'Europe), SONEL (évolution long terme du niveau moyen des mers, données marégraphiques corrigées des effets des mouvements de la croûte terrestre via observations GPS co-localisées), Gloss - Monde, Projet Prévimer, Statistiques des niveaux marins extrêmes (SHOM/CETMEF, 2008 ; SHOM/CETMEF, 2012)

États de mer : Météo-France, Wettercentral ou NOAA, ANEMOC (Atlas Numérique des États de Mer Océaniques et Côtiers - données numériques obtenues par simulations rétrospectives de EDF-LNHE /CETMEF), CANDHIS Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ - mesures issues du réseau national de mesures in-situ du CETMEF), Projet Prévimer, sémaphores, etc.

Données hydrologiques : Banque HYDRO, comités de gestion de l'eau, organismes référents locaux, etc.

3.3.3 - Fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

L'analyse de la dynamique hydro-sédimentaire du secteur d'étude prend en compte les cellules sédimentaires ainsi que les différentes caractéristiques permettant d'en rendre compte : la position du trait de côte, le profil de plage et les transports de sédiments intervenant sous l'effet du vent au sein du système dunes/plages ou sous l'action des vagues et des marées. L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire est indispensable dans le cadre de l'analyse des évolutions du trait de côte des côtes basses meubles et pour comprendre les mouvements de sédiments jouant un rôle protecteur en pied de falaises. L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire s'appuie sur les points suivants :

- définition des cellules hydro-sédimentaires,
- les positions historiques du trait de côte,
- les profils de plage,
- les évolutions bathymétriques,
- analyse qualitative et/ou quantitative des transports sédimentaires liés au vent,
- analyse qualitative et/ou quantitative des transports sédimentaires sous l'action des houles et des marées.

3.3.3.a - La cellule hydro-sédimentaire

Le littoral agit comme un système dont l'équilibre dynamique dépend des échanges et des transferts de sédiments qui se produisent latéralement sous l'action des vagues obliques à la côte, ou transversalement sous l'action des courants, entre le large et la côte : érosion des falaises, apports fluviaux, stockage dans les dunes, transports éoliens, etc. Le découpage en systèmes ou cellules dites hydro-sédimentaires est nécessaire afin de délimiter le bassin de risque au sein duquel se font les échanges sédimentaires. Le fonctionnement de ces cellules peut être plus ou moins complexe. Elles peuvent fonctionner selon trois modes : en système fermé, semi-fermé ou ouvert, selon le niveau d'échange sédimentaire avec l'extérieur de la cellule. Certaines cellules intègrent les espaces arrière-littoraux tels que marais, étangs et estuaires.

La connaissance du fonctionnement hydro-sédimentaire permet de déterminer les limites de ces cellules. L'évolution du littoral et de la dynamique sédimentaire (cf. 3.3.3.b à 3.3.3.e ci-après) doit

⁷ <http://refmar.shom.fr>

être étudiée au niveau de l'ensemble de la cellule. Pour cela, les sens des principaux transports de sédiments et l'ordre de grandeur des volumes transportés, si possible, sont utiles. Les apports et pertes en sédiments (naturels ou anthropiques) doivent être identifiés. Le bassin d'étude des aléas retenu doit être compatible avec les limites de ces cellules.

La cellule hydro-sédimentaire est délimitée par des frontières longitudinales et transversales, présentées dans l'encart 6.

Encart 6 : Les limites de la cellule hydro-sédimentaire

La cellule sédimentaire, nommée également unité ou compartiment hydro-sédimentaire, est délimitée par des frontières plus ou moins perméables aux échanges sédimentaires (cf. Illustration 13). Ces frontières peuvent être fixes (cap rocheux, jetées, digues...) ou mobiles (dunes, falaises meubles, limite d'action des houles, point d'inversion de la dérive littorale).

Les limites latérales : Les limites transversales sont des points d'arrêt plus ou moins perméables au transit sédimentaire. Leur niveau de perméabilité (passage sédimentaire potentiel, volumes sédimentaires bloqués, voire volumes sédimentaires perdus en cas de dragage) et leurs dates de mise en place pour les limites anthropiques (voire la chronologie d'implantation des ouvrages) sont des éléments importants à connaître. Il arrive parfois que les systèmes (ou cellules) soient dits ouverts, c'est-à-dire que les limites correspondent au point d'inversion de la dérive littorale. Dans ce cas, les échanges avec les cellules voisines sont importants. Il est utile d'établir le bilan des entrées et des sorties sédimentaires (bilan sédimentaire) bien que celui-ci soit délicat à apprécier.



Illustration 13 : La cellule hydro-sédimentaire et son bilan sédimentaire (Source : S. Costa)

Limite vers le large et limite interne :

Dans ce cadre, la limite d'action des vagues sur les fonds marins permettant la mobilisation des sédiments, appelée profondeur de fermeture peut être définie. L'existence d'éventuels échanges sédimentaires depuis l'estran vers le large (courant de retour ou mouvement sédimentaire induit par des canyons sous-marins), et donc de pertes sédimentaires, peut également être identifiée.

Par ailleurs, les apports en sédiments issus des rivières et des fleuves doivent être appréciés s'ils participent à l'équilibre sédimentaire des plages (apports moyens annuels et apports lors de crue). Les échanges avec les marais et étangs arrière-littoraux sont également à apprécier.

Dans le cas de côtes coralliennes, les cellules hydro-sédimentaires incluent les parties interne (platier) et externe (pentes externes se raccordant aux plaines sous-marines) du récif. Le système plage/récif ou île/récif est plus ou moins ouvert sur les petits fonds marins en fonction du nombre et de la dimension des passes et autres échancrures du récif.

3.3.3.b - *Le trait de côte : modalités de définition et limites*

L'adoption d'une définition unique du trait de côte est complexe. Elle pose la question de l'adoption d'un standard qui rende inter-comparables les analyses de suivi de l'évolution du trait de côte. Le trait de côte, défini ici par une approche technique, est à distinguer clairement de la définition juridique de la limite haute du Domaine Public Maritime.

En matière de cartographie marine et terrestre, le trait de côte est défini comme la ligne portée sur la carte séparant la terre et la mer. Il s'agit le plus souvent d'une laisse de haute mer. L'évolution de la position du trait de côte permet de rendre compte de la dynamique côtière. Cette dernière peut être représentée par un recul ou une avancée de la ligne du rivage au cours d'un intervalle de temps donné. Le trait de côte est donc un objet géographique utile pour cartographier les zones mobiles, permettant à partir de deux ou plusieurs positions successives de déterminer un taux moyen annuel d'évolution (de recul ou d'avancée) exprimé en mètre par an. Aussi, il convient de s'appuyer sur une définition du trait de côte dont les changements dans le temps représentent au mieux l'évolution de la limite terre-mer. C'est pourquoi, différentes définitions, ou plutôt différents indicateurs de sa position, co-existent et peuvent être adoptés pour tenir compte de la diversité des morphologies du littoral. Les nombreuses études relatives aux limites du rivage adoptent des critères différents, principalement géomorphologiques (cf. Illustration 14). Les indicateurs de position du trait de côte (cf. Encart 7) doivent permettre une localisation reproductible. Ils doivent ainsi prendre en compte les moyens dont dispose l'observateur pour localiser l'objet « trait de côte » (théodolite ou dGPS pour le repérage d'une cote altimétrique, photographies aériennes pour le repérage d'une laisse de pleine mer, d'une limite de végétation pérenne...).

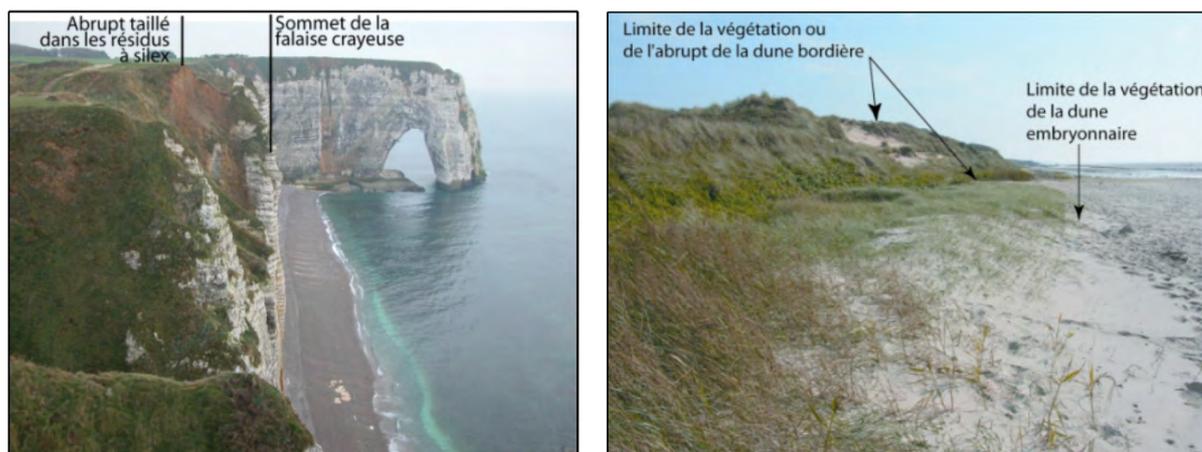


Illustration 14 : Interprétation de traits de côte pouvant être suivis pour divers types de côte (falaise, Etretat -76- ; dune, Merlimont -62-) (Source : S. Costa).

Encart 7 : Indicateurs de position du trait de côte

La littérature est riche de définitions du trait de côte ou d'indicateurs de la position du trait de côte. Boak et Turner (2005) ont ainsi répertorié 45 indicateurs de la position du trait de côte, utilisés à travers le monde à des fins d'étude d'évolution du littoral, définis depuis les années 1950 dans la littérature scientifique (cf. Illustration 15).

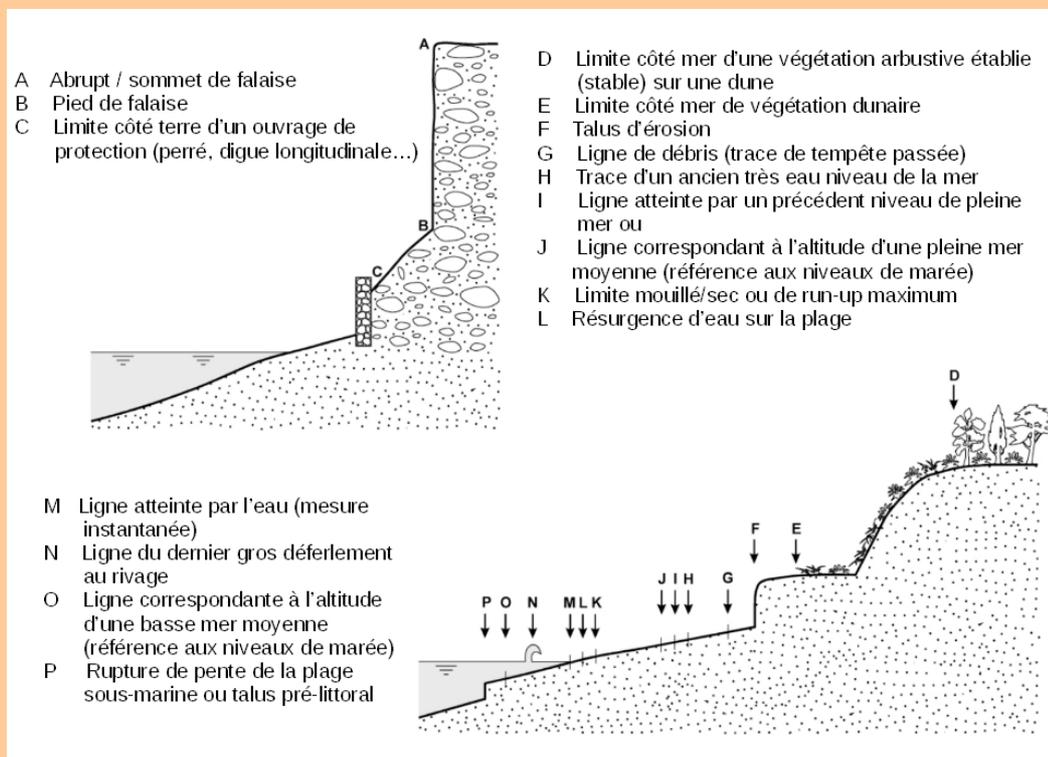


Illustration 15 : Représentation schématique d'indicateurs de position du trait de côte utilisés couramment (d'après Boak and Tuner, 2005)

Les indicateurs reposent sur des éléments qui permettent de les classer en 4 classes :

- les indicateurs altimétriques : ils correspondent à l'intersection d'une cote altimétrique caractérisant un niveau marin le plus souvent, avec des données topographiques ;
- les indicateurs hydrodynamiques : ils reposent sur les effets hydrauliques et hydrodynamiques à la côte, essentiellement sur les côtes basses meubles, des phénomènes météo-marins ;
- les indicateurs géomorphologiques : ils sont liés aux discontinuités morphologiques de chaque type de côte ;
- les indicateurs botaniques : ils reposent sur la présence de végétation ou d'une espèce particulière.

Les critères morpho-sédimentaires et botaniques ont été étudiés dans le cadre de l'étude *Reconnaissance de la limite terrestre du domaine maritime* (CETMEF, 2002).

Les indicateurs décrits ci-après sont parmi les plus couramment rencontrés.

Indicateurs altimétriques :

Plusieurs cotes peuvent être utilisées pour définir des indicateurs altimétriques. La cote la plus couramment rencontrée permettant de définir une position de trait de côte est le niveau des plus hautes mers astronomiques. Le trait de côte alors défini correspondant à la définition du SHOM, « la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales ».

Indicateurs hydrodynamiques :

- Limite de déferlement : point de déferlement le plus éloigné de la côte (instantané ou moyenné),
- Résurgence d'eau sur la plage : limite de la zone de saturation,
- Limite de jet de rive : intersection entre la topographie et le niveau d'eau instantané (instantané ou moyenné),
- Limite supérieure des sédiments mouillés (ou limite de la précédente pleine mer) : limite supérieure atteinte par le jet de rive lors de la précédente pleine mer,
- Ligne de débris : limite atteinte par une précédente pleine mer,
- Limite de pénétration du jet de rive lors de tempête : limite de pénétration des eaux marines lors de tempêtes, situées en arrière de la végétation herbacée et souvent matérialisée par la limite de végétation pérenne.

Indicateurs géomorphologiques :

Pour les falaises :

- Encoche basale : limite côté terre de l'encoche, provoquée par les chocs de vagues, en pied de falaise,
- Pied de falaise : intersection entre la paroi et le plan d'eau ou la topographie de l'estran, alors matérialisé par une rupture de pente,
- Rupture de pente : rupture de pente de la paroi dans le cas de falaises meubles,
- Haut du cône d'éboulis : rupture de pente dans les roches sédimentaires correspondant à une zone de départ d'un effondrement,
- Haut (ou sommet) de falaise : zone de départ des effondrements. Pouvant être confondue avec la première rupture de pente ou le haut du cône d'éboulis.

Pour les côtes basses meubles :

- Première barre d'avant-côte : formation sédimentaire due au déferlement des vagues, souvent développée parallèlement à la côte,
- Talus pré-littoral (ou de collision) : rupture de pente immergée, située pour les littoraux à faible marnage entre la plage immergée et émergée,
- Limite (ou crête) de la berme : zone d'accumulation de sédiments en haut de plage, liée au déferlement,
- Pied de dune : rupture morphologique entre la dune et la plage. En cas d'érosion, talus d'érosion ou falaise dunaire,
- Crête de dune (dune blanche) : sommet de la dune,
- Limite dune blanche/dune grise : limite entre la dune blanche (souvent couvertes d'oyats) et l'arrière dune.

Pour les cordons de galets :

- Crête de la berme : zone d'accumulation liée au déferlement (dernier replat sommital côté terre si existence de plusieurs bermes),
- Abrupt : rupture de pente en cas d'érosion.

Pour les zones d'accumulations (marais, estuaires, mangrove...) : la géomorphologie est directement liée à la végétation.

Indicateurs botaniques :

Pour les falaises :

- limite inférieure de la végétation terrestre,
- limite supérieure de la végétation maritime : végétation pouvant être de plusieurs types (lichens, algues...).

Pour les côtes basses meubles :

- limite inférieure de la végétation : limite de végétation dunaire (chiendent des sables, oyat),
- limite inférieure de la végétation pérenne : limite de la végétation de type arbres ou arbustes.

Pour les cordons de galets :

- limite inférieure de végétation pérenne : limite de végétation dont le type dépend du degré de stabilité du cordon (lichens, plantes supérieures vivaces...).

Pour les zones d'accumulations (marais, estuaires, mangrove...) :

- limite slikke/schorre : limite micro-topographique marquée entre les zones recouvertes à chaque pleine mer, même en mortes eaux, et les zones recouvertes lors de niveaux supérieurs, slikke et schorre étant caractérisés par des espèces halophiles spécifiques,
- limite topographique du haut schorre : limite micro-topographique également caractérisée par des variations des espèces halophiles.



Illustration 16 : Indicateurs de la position du trait de côte : pied de dune avec falaise dunaire à gauche, limite inférieure de la végétation à droite (Source : M.H. Ruz)

Le relevé d'un indicateur peut ne rendre compte que d'une situation temporaire. A ce titre, la présence, en haut de plage d'une dune entaillée en falaise vive (cf. Illustration 16) est un bon indicateur d'une phase érosive récente, pouvant cependant être ponctuelle en réponse à un épisode de tempête. Dans ce cas, la dune bordière entaillée peut retrouver à moyen terme un profil d'équilibre avec des éboulements du cordon en place. En phase de répit d'érosion marine, des apports sédimentaires d'origine éolienne peuvent s'accumuler sous forme d'avant-dunes. Un versant dunaire en forte pente et dénué de végétation indique temporairement une tendance à l'érosion qui se traduit par un recul du trait de côte. Un contact doux entre le versant externe de la dune et la plage traduira au contraire une phase de répit d'érosion notable. L'analyse de ces évolutions de moyenne échéance est utile pour rendre compte de l'espace de liberté de la frange côtière et de sa résilience naturelle après un épisode de tempête.

L'indicateur retenu dépend de la géomorphologie mais aussi le plus souvent des données sources disponibles. Une critique des indicateurs retenus doit être réalisée afin de tenir compte des incertitudes associées à la définition de la position du trait de côte.

Les comparaisons des changements de position de ces marques dans le temps sont des indicateurs de la mobilité du littoral, à condition que soit toujours comparé un même objet géographique et ce à la même échelle. Cependant, il serait illusoire de réduire le trait de côte à une simple ligne ; seuls les indicateurs de position du trait de côte peuvent être représentés sous cette forme. En fait, le trait de côte traduit une réalité dynamique et est représentatif d'un lieu, la frange littorale, où se combinent et s'affrontent les éléments qui entraînent la mobilité du rivage et la grande variabilité spatiale des formes. Le trait de côte, quelle que soit la définition utilisée, est un indicateur simple d'une limite terre-mer et l'évolution du trait de côte est un indicateur simple de l'évolution du littoral (recul ou avancée). La position du trait de côte présente cependant l'inconvénient majeur de ne pas renseigner sur l'évolution des plages sub-aériennes et sous-marines, lesquelles peuvent connaître des engraissements et des démaigrissements, indépendamment parfois de la position du trait de côte. Sur des périodes de temps pluri-annuelles, dans le cas de tendances évolutives où le système répond à une dynamique strictement marine, l'évolution du trait de côte est cependant souvent corrélée à l'évolution de la plage.

3.3.3.c - Le profil de plage : modalités de définition et limites

Le profil de plage est une vue en coupe verticale, perpendiculaire au trait de côte, de la topographie de la plage. L'analyse de ce profil permet de mettre en évidence l'évolution de la surface du prisme sédimentaire de la plage dans sa partie sub-aérienne ou intertidale, voire sous-marine, et d'évaluer les variations de volumes sédimentaires (cf. Illustration 17). La mesure du profil peut être acquise par divers moyens topographiques : suivi de piquets, levé topographique au niveau de chantier ou au tachéomètre laser, recours au dGPS, à la photogrammétrie ou encore au laser aéroporté, etc. Elle fournit de précieuses informations sur l'évolution de l'altitude de la plage sub-aérienne, elle-même fondamentale pour définir le point de déferlement des vagues notamment lors de tempêtes.

La connaissance apportée par cet outil reste malgré tout partielle pour comprendre l'ensemble des dynamiques sédimentaires attachées à la plage. En effet, la variation du profil ne met en évidence qu'une partie des variations volumétriques de la morphologie de l'ensemble de la plage active (des petits fonds jusqu'à l'estran) et n'est pas nécessairement représentative du linéaire. Idéalement, il conviendrait de prendre en considération les transferts/échanges sédimentaires jusqu'à la profondeur limite de remaniement des sédiments par les agents hydrodynamiques. Cette remarque est d'autant plus importante pour certaines côtes d'accumulation (notamment sableuses) où les phénomènes d'érosion peuvent apparaître d'abord sur la plage sous-marine avant d'être repérés sur la plage sub-aérienne puis au niveau du trait de côte. De plus, plusieurs profils sont nécessaires pour comprendre le fonctionnement sédimentaire complet en intégrant les transports longitudinaux.

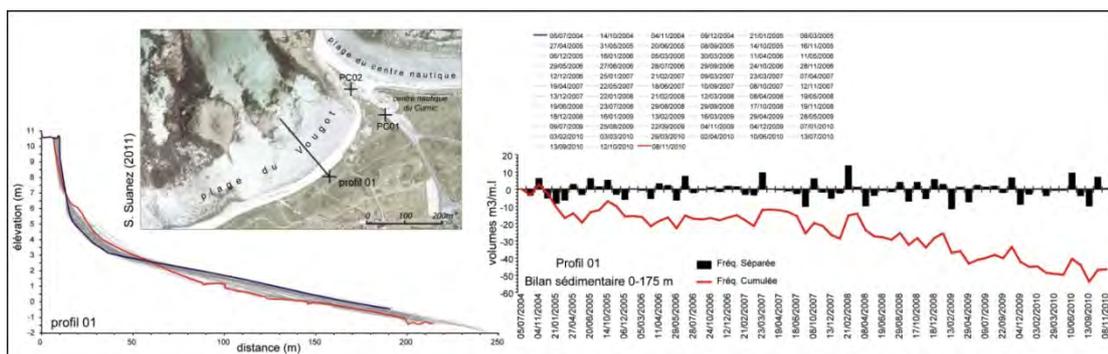


Illustration 17 : Enveloppe de profils de plage intertidale / dune et calcul du bilan sédimentaire entre 2004 et 2010 – Plage du Vougot, Guissény, Finistère – (Source : Suanez et al., 2012).

3.3.3.d - Le système dune-plage : un transport sédimentaire lié au vent

Le système dune-plage constitue un stock sédimentaire important mis en mouvement par les vents. Les vents peuvent être orientés vers la terre, ou au contraire transporter les sables vers la mer, où ils peuvent être pris en charge par les courants locaux.

Le transport éolien annuel des sédiments fins peut être estimé à partir de méthodes classiques d'ingénierie à condition de posséder des données anémométriques pluri-annuelles. Il est donc aisé d'estimer si la rose des vents, et donc les vents efficaces dominants sur le site d'étude, est favorable ou non à la construction des dunes. La représentativité des approches théoriques ne doit cependant pas être surestimée. En effet, celles-ci ne prennent pas en compte tous les paramètres influant le transport sédimentaire : l'humidité des sables qui limite le transport, les effets de pavage liés aux éléments plus grossiers, la topographie de la plage, les lasses de mer, la végétation...

Par conséquent, l'approche théorique devra obligatoirement être couplée à l'étude morphodynamique du système dune-plage à plusieurs échelles temporelles. Pour cela, il peut être utile de déterminer l'âge des dunes, car certaines accumulations sont anciennes (âge supérieur à 100 et 1000 ans), et de bien comprendre la dynamique dunaire à moyen terme par l'examen de photographies aériennes et/ou de profils topographiques, voire de mesures expérimentales si existantes.

3.3.3.e - Les transports sédimentaires sous l'action des houles et des marées

Traditionnellement, les mécanismes sédimentaires responsables de l'érosion d'une côte meuble sont séparés en deux composantes, l'une dite longitudinale, l'autre dite transversale par rapport au rivage.

La composante longitudinale du transport sédimentaire : la dérive littorale

Le transport sédimentaire par la dérive littorale existe dès lors que les vagues sont obliques au rivage. Celle-ci peut déplacer des volumes sableux importants, jusqu'à 400 000 m³/an en Camargue (Sabatier, 2001). Sur les plages suffisamment longues pour que les vagues obliques puissent se répandre sur plusieurs kilomètres (plages ouvertes aux houles du large), les déplacements pluri-annuels du rivage sont à mettre en relation directe avec la dérive littorale.

Cette dérive n'entraîne pas nécessairement de variations du volume sédimentaire, les volumes entrant sur une section de linéaire côtier par transport longitudinal pouvant être égaux aux volumes sortant de cette section. Cependant, dans les secteurs où la quantité de sable transporté potentiellement par la dérive littorale augmente en direction du transit dominant, c'est-à-dire que la quantité de sable mobilisé est supérieure à la quantité de sable déposé, on peut considérer que le rivage subira un recul ou que les fonds s'abaisseront. A l'inverse, si l'intensité du transport littoral longitudinal annuel diminue en direction du transit dominant, alors, sous effet de perte de compétence, le sable se dépose et le rivage avance vers la mer. Un phénomène de progradation, c'est-à-dire d'accrétion sédimentaire, se produit alors.

Ainsi, les variations du transport sédimentaire par la dérive littorale méritent d'être étudiées lorsqu'on recherche les éléments explicatifs d'un recul pluri-annuel du rivage (moyen et long terme). La quantification du transit littoral annuel doit donc logiquement être entreprise pour aider à la compréhension du fonctionnement du site d'étude. Définir la direction dominante du transit littoral est donc important pour comprendre l'organisation des transits sableux et des cellules littorales mais non suffisant pour expliquer les zones en recul et celles en accrétion.

La composante transversale du transport sédimentaire : transport dans le profil

Sur les plages de baie, les vagues sont souvent frontales et induisent plus d'échanges sédimentaires transversaux que longitudinaux. Le transport sédimentaire transversal est souvent analysé durant les tempêtes car il mobilise alors d'importantes quantités de sédiments. Durant ces événements de haute énergie mais de courte durée, il est admis que les sédiments sont déplacés dans le profil de plage. En effet, à cette échelle temporelle, leur transport longitudinal est souvent faible. Ces transports dans le profil sont responsables parfois de déplacements importants de sédiments dans les petits fonds qui peuvent mettre de nombreux mois, voire des années pour remonter sur l'estran. La proximité de canyons ou de fortes pentes près du rivage est une condition encore plus défavorable au retour de ces sédiments.

Méthodes d'estimation des transports sédimentaires

L'analyse qualitative de la morphologie et des transports sédimentaires (direction, sens dominant, type de processus en jeu, type de transport, intensité, volumes, et limites - fixes et mobiles - de la cellule hydro-sédimentaire), et des agents et processus qui les génèrent, est indispensable à la compréhension du fonctionnement sédimentaire et donc de l'équilibre dynamique de la zone d'étude.

En l'absence de données quantitatives, des observations de terrain de type hauteurs relatives des sédiments de part et d'autre des épis, jetées ou obstacles, orientation des flèches littorales, etc., peuvent constituer des indicateurs qualitatifs, voire semi-quantitatifs permettant de définir les transports dits résiduels, et par conséquent d'établir un schéma général de fonctionnement du système sédimentaire. Les formes littorales, comme les flèches, traduisent, en fonction de leur orientation générale, le sens prédominant des déplacements de sédiments sous l'action des houles dans la zone de déferlement. Les observations de terrain des formes les plus fines et les photographies aériennes effectuées à marée basse sont riches d'enseignements. Enfin, l'analyse de la nature et la distribution granulométrique des matériaux sur l'estran est également le reflet direct des agents dynamiques. Ainsi, les éléments grossiers se situent dans les secteurs de forte énergie (haut-estran par exemple), et les plus fins se trouvent dans des environnements plus calmes.

La compréhension du fonctionnement sédimentaire s'appuie le plus possible sur la bibliographie existante. Le jugement d'expert est essentiel lors de cette étape et peut servir de base à l'élaboration d'un modèle conceptuel du fonctionnement sédimentaire si nécessaire. De nombreuses méthodes ont été développées pour estimer les transits sédimentaires (cf. Encart 8)

D'après les informations collectées lors des étapes précédentes, il est possible de se prononcer sur les différents mécanismes de transport sédimentaire qui régissent le comportement du site d'étude.

Encart 8 : Bilan des méthodes d'estimation des transits sédimentaires pour les sédiments non cohésifs

L'estimation des transits sédimentaires, c'est-à-dire la composante longitudinale du transport de sédiments le long d'un littoral, repose sur la quantification de la capacité des agents hydrodynamiques (vagues, courants) à déplacer les sédiments constituant la plage sous-marine et aérienne sur un intervalle de temps donné (quelques heures à quelques années). Cette quantification est le résultat de calculs complexes qui doivent tenir compte (i) des vagues (hauteur, période, direction), (ii) des courants (de houle, de marée et induits par le vent), (iii) des interactions houles/courants, (iv) des caractéristiques des sédiments (masse volumique, taille des grains) et (v) de la rugosité de forme de la surface du fond de la plage sous-marine (rides).

La quantification de ces transports, voire leur modélisation n'est toutefois pas aisée. En absence d'informations, et afin de comprendre les mécanismes de transport parfois complexes, l'estimation des volumes transportés sur un site d'étude peut être effectuée à l'aide de formules empiriques ou de la construction d'un modèle numérique.

Formules de transport longitudinal globales

Parmi les différentes approches existantes, la plus simple d'utilisation est celle consistant à calculer les flux de sédiment longitudinal Q (m^3s^{-1}) en utilisant une formule empirique reposant sur la proportionnalité du débit solide longitudinal avec le flux d'énergie des vagues dans la zone de déferlement. Ce type d'approche nécessite de connaître a minima les caractéristiques des vagues

au déferlement (hauteur et angle d'incidence), ces caractéristiques pouvant être estimées à partir des caractéristiques au large (USACE, 1984). La formule la plus connue est celle de l'US Army Coastal Engineering Research Center (CERC) (USACE, 1984).

De manière générale, tant que l'angle d'incidence des vagues reste inférieur à 45° (ce qui est souvent le cas), les flux augmentent avec l'angle d'incidence et les hauteurs de vagues. Ce sont deux comportements génériques de toutes les formules de flux de sédiments longitudinaux. La formule du CERC ne prend cependant pas en compte la morphologie de la plage (la pente moyenne par exemple), ou la taille des sédiments. D'autres formulations, comme celle de SOGREAH-LCHF (Mignot, 1988), permettent de prendre en compte indirectement la taille de grain des sédiments. D'autres formulations permettent de prendre en compte aussi la morphologie de la plage, comme par exemple celle de Kamphuis (1991).

Il existe un certain nombre de modèles d'ingénierie basés sur ce type d'approche, en y incluant un modèle de propagation de vagues pour connaître les caractéristiques des vagues au déferlement, et, ensuite permettre le calcul des flux de sédiments longshore avec des formules empiriques comme celles du CERC (1984). On peut citer : NMLong-CW, Genesis, Delft3D-Online.

Comme rappelé par Pilkey and Cooper (2002), il existe une forte incertitude dans les résultats obtenus à partir des formules de transport longitudinal, la plupart de ces formules ayant été établies pour des situations calmes, en dehors des périodes de tempêtes. Ces formules fournissent donc des ordres de grandeur à manipuler avec grande précaution.

Modélisation numérique hydro-sédimentaire

La mise en œuvre de la modélisation peut être utile pour déterminer le sens et l'intensité des transits sédimentaires. Cela sera cependant réservé à des cas très spécifiques. Il convient de réaliser ce type d'analyse avec le plus grand soin, surtout en ce qui concerne : le choix des conditions aux limites au large (ex. : climat de vagues), le modèle hydrodynamique (vagues et courant) et le modèle de transport sédimentaire.

Dans la pratique, on a le plus souvent recours à des modèles hydrodynamiques complets (niveaux, courants, vagues) qui, en tous points d'un maillage, fournissent les variables et paramètres hydrodynamiques nécessaires au calcul de flux de sédiments. Il existe ainsi des modèles numériques (codes de calcul) opérationnels, couplant module de houle (ex. Delft3D-Wave, Mike 21 SW, Swan, Tomawac) et module de niveaux/courants (ex. Telemac2D/3D, Delft2D/3D-Flow, Mars, Mike 2D/3D Flow model).

De nombreuses formules locales de transport existent, développées le plus souvent sur la base de mesures en laboratoire. Parmi les principales formules utilisées dans les codes numériques opérationnels (ex. Telemac, Delft3D, Mike), on peut noter : Bijker (1968), Bailard (1981), Van Rijn (1989), Dibajnia and Watanabe (1992) et Ribberink (1998). Camenen and Larroudé (2003) ont réalisé une revue de ces formules.

Les méthodes classiques d'ingénierie peuvent être déployées pour le calcul de la dérive littorale (modèles mathématiques numériques 2DV, 3D tels que Delft3D, Mike 21 ST, Sisyphe ou Sedi-3D) et, de manière générale, pour le calcul des transports sédimentaires.

Pour obtenir la résultante des transports sédimentaires longitudinaux, il reste ensuite à intégrer les flux de sédiments calculés en chaque point, sur la bande littorale active, et sur une période donnée.

Les modèles doivent être correctement calibrés et validés par des mesures in situ, rendant parfois nécessaire la mise en place de houlographes, courantmètres et capteurs de pression, couplés avec des relevés de terrain (profils, MNT, Lidar...) à haute résolution et pièges à sédiments.

Lorsque la quantification d'un processus est difficile, une estimation qualitative peut suffire (transport faible, moyen, fort...).

De même que pour les formules de transport de sédiments longitudinal, les résultats de ces modèles sont à utiliser avec précaution dans la mesure où l'estimation des flux de sédiments locaux à partir des conditions hydrodynamiques (courants, vagues) est encore du domaine de la recherche.

La figure ci-dessous (cf. Illustration 18) illustre les différences de flux de sédiments longitudinaux entre une approche basée sur l'utilisation de la formule du CERC et une approche utilisant le code Delft3D (List and Ashton, 2007), ici pour le cas d'une côte rectiligne soumise à des vagues de mer de vent. On constate par exemple que pour les mers de vent de fort angle d'incidence, le flux de sédiments varie du simple au double suivant l'approche utilisée.

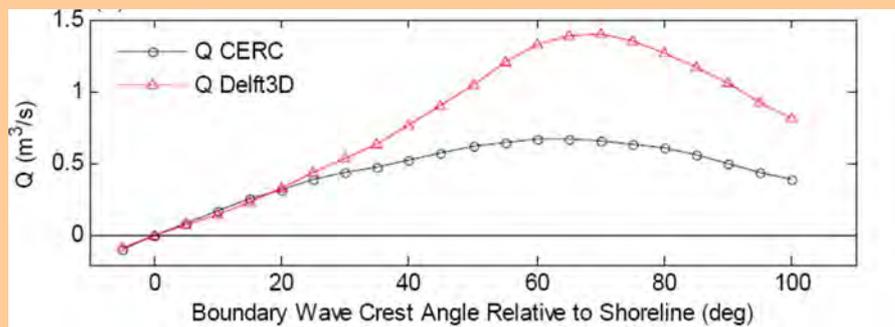


Illustration 18 : Flux de sédiments longitudinal en fonction de l'angle d'incidence des vagues au large par rapport à la côte sur une côte uniforme, cas d'une mer de vent (Source : List and Ashton, 2007).

3.3.3.f - L'analyse du recul des falaises : actions continentales et marines

L'efficacité des facteurs à l'origine du recul est fonction des caractéristiques morphologiques (ampleur du relief) et géologiques du massif rocheux en présence, pour lesquelles les impacts du ruissellement, de l'infiltration et des cycles de gel/dégel sont différents, et des caractéristiques des conditions marines (cf. Illustration 19). Une synthèse du phénomène de recul et de ses causes doit être réalisée afin de comprendre les évolutions passées et de prévoir les évolutions futures.

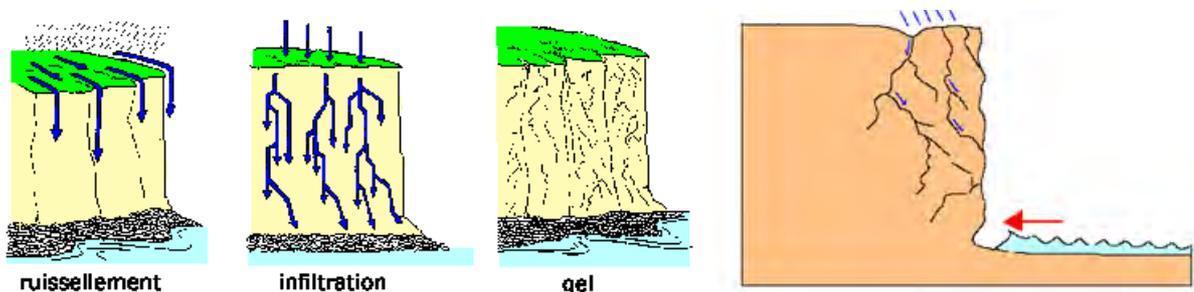


Illustration 19 : Principales actions continentales et marines à l'origine du recul des falaises et côtes rocheuses (d'après Paskoff, 1993)

Les actions dites continentales (ruissellement, infiltration, nappes phréatiques, alternance gel/dégel, appel au vide...) vont contribuer à ameublir les roches, souvent sur des pas de temps longs, mais également à exploiter leurs lignes de fragilités. A partir des données climatiques et météorologiques recueillies, il est utile de déterminer les modalités de ruissellement et d'infiltration de l'eau en superficie et au sein du massif rocheux. En effet, des éléments de connaissance doivent être apportés sur les caractéristiques hydrogéologiques du secteur étudié : fissures suintantes, réseau karstique, niveaux de nappes phréatiques ou de nappes perchées... Le tout peut être modifié par des actions humaines (prélèvements par pompage, imperméabilisation des sols...). Ces actions peuvent être influencées par l'urbanisation (présence de réseaux souterrains, modification du ruisselllements...). Il peut ainsi être intéressant de mettre en regard l'analyse diachronique et l'approche historique.

L'analyse de la fréquence et de l'intensité des alternances gel/dégel est également importante. Au-delà de la description des facteurs et des processus d'érosion, l'intérêt de ce travail, corrélé à l'inventaire des événements passés, réside dans la détermination possible de la saisonnalité des mouvements des versants côtiers étudiés, voire des facteurs fondamentaux et/ou secondaires agissant sur le déclenchement des événements (cf. Illustration 20).

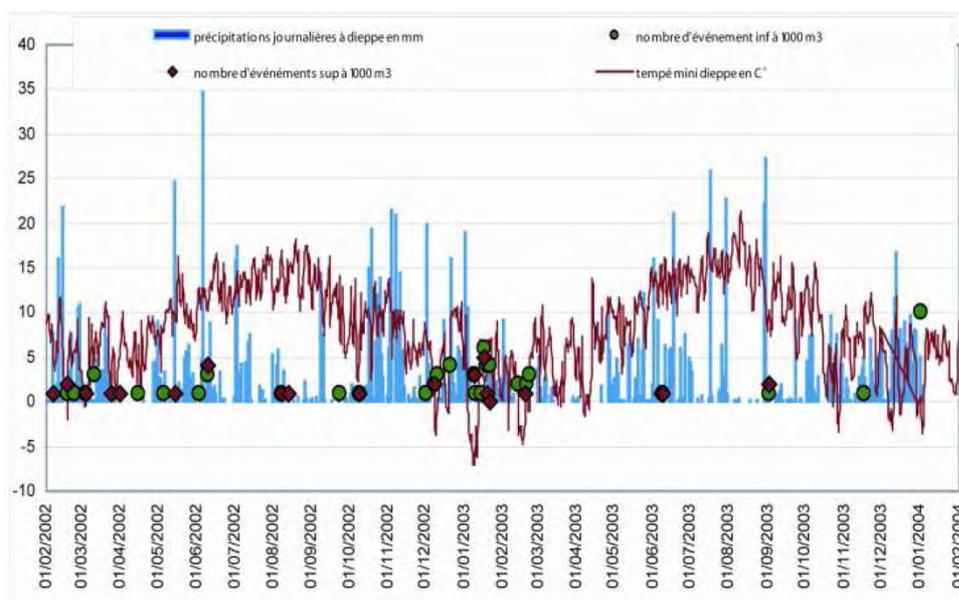


Illustration 20 : Relation entre la date d'effondrement et les conditions météorologiques pouvant être responsables (températures et précipitations) pour les falaises crayeuses de Seine-Maritime (Costa, 2005).

Les conditions marines, les vagues, le niveau marin et leurs temps d'action sur le pied de falaises sont à étudier. L'énergie libérée brutalement lors du déferlement des vagues a d'importantes conséquences sur la stabilité des versants côtiers et des falaises. Plus que le sapement des vagues à la base des massifs rocheux, c'est l'action de déblaiement des matériaux jouant le rôle de butée stabilisatrice au pied des versants qui est à prendre en considération. A partir des données rassemblées lors de l'analyse générale, pourront être définies les zones battues par la houle, mais également la fréquence et l'intensité des actions marines sur les versants côtiers et les falaises.

L'analyse des évolutions des falaises est menée à différentes échelles de temps. L'évolution à long terme doit en effet être vue comme le résultat de mouvements ponctuels (éboulements, effondrements...). Les vitesses moyennes d'évolution du trait de côte entre les dates d'observation doivent être quantifiées, de même si possible que le rythme du recul, voire les « cycles d'évolution ». L'analyse des évolutions passées est faite sur une période d'observation supérieure

au cycle d'évolution. Un intervalle de temps trop faible peut correspondre à la période de crise (période des effondrements), ce qui maximiserait l'aléa, ou à la période de « calme » (période de préparation/érosion du massif rocheux), ce qui minimiserait l'aléa. L'emprise spatiale par événement (éboulement/écroulement, glissement) doit également être quantifiée. En effet, la position du trait de côte estimée, calculée à partir des vitesses moyennes de recul sur une période calme, peut parfois être moins éloignée de la position actuelle que celle induite par un seul événement, d'où la nécessaire prise en compte des événements ponctuels.

3.3.4 - Les ouvrages de protection contre les aléas littoraux

Les ouvrages de protection ont vocation à assurer la protection d'un secteur de côte vis-à-vis d'aléas, principalement la submersion marine ou le recul du trait de côte, en modifiant localement les phénomènes naturels hydrauliques ou sédimentaires.

Comprendre l'impact des ouvrages de protection côtiers et leur interaction avec les phénomènes naturels littoraux nécessite, pour chacun d'entre eux, de connaître et caractériser si possible :

- leur géométrie : hauteurs et dimensions, cotes de référence, profil en long en crête, profil en travers incluant l'estran, l'avant-côte et la zone en arrière de l'ouvrage ;
- leurs type et mode de fonctionnement hydraulique et/ou sédimentaire ;
- leur structure, les matériaux constitutifs ainsi que les modes de défaillance ;
- leur implantation : date, fonctionnalités attendues, impact sur la dynamique sédimentaire et l'évolution du trait de côte ;
- l'historique des désordres et des défaillances : affouillements, érosion due aux surverses, forme et dimensions des brèches, moment de rupture, modes de défaillance, etc., permettant d'affiner les hypothèses de rupture et le calage des modèles de propagation des submersions marines ;
- le gestionnaire compétent.

Les informations relatives aux ouvrages, en situations actuelle et historique, en particulier les dégâts et brèches suite aux événements, sont à géolocaliser si possible.

La protection contre une inondation nécessite un système de protection continu. Il est constitué de plusieurs structures ou éléments de protection, pouvant être de différents types (structures naturelles, ouvrages de type digue composant un ou plusieurs rangs d'endiguement...), qui établissent un système de protection propre à un site, secteur alors appelé « zone protégée » (cf. décret relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques de décembre 2007). Il peut être complété par d'autres protections comme les dispositifs de drainage, de stockage et d'évacuation des eaux qui sont également à recenser. Les principes de fonctionnement de chacun de ces ouvrages doivent également être décrits.

Pour définir le système de protection, une identification de chacun des éléments de protection concourant à la défense de la zone protégée (ouvrages, cordons naturels, remblais d'infrastructures...) est nécessaire. Pour assurer cette identification, on peut se référer à *Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers - Notice méthodologique* (CETMEF, 2011). Le rôle particulier des différents ouvrages qui le composent, ainsi que le rôle de la topographie, doivent également être analysés.

Pour établir cette connaissance, il est nécessaire de s'assurer auprès des services de l'État, et en particulier du Service de Contrôle des Ouvrages Hydrauliques (SCOH) compétent, des données disponibles dans la base de données nationale « SIOUH ». Par ailleurs, pourront être combinées visites de terrain, analyse des documents d'archive et identification d'études menées

éventuellement suivant d'autres finalités que celle du PPR, par exemple l'étude de danger réalisée pour les ouvrages classés au titre de la réglementation sur les ouvrages hydrauliques. Il convient de s'assurer que les informations obtenues sont fiables, toujours actuelles et exploitables en vue de l'élaboration du PPR.

3.3.5 - Analyse du fonctionnement hydraulique du site

La frange littorale a été modélisée au cours du temps par l'eau, que ce soit par la mer par le biais de l'impact des conditions hydro-dynamiques courantes, des tempêtes génératrices de submersions, ou encore par les pluies, les apports des cours d'eau... L'analyse de la géomorphologie et de la topographie de la zone est donc un élément incontournable de la compréhension du fonctionnement hydraulique du site.

L'analyse du fonctionnement hydraulique permet de comprendre les interactions entre la mer, et plus généralement l'eau, et le littoral dans l'objectif d'identifier les zones potentiellement soumises à des inondations. Cette analyse comprend :

- l'identification des zones les plus basses topographiquement ;
- la détermination des origines possibles d'une inondation : secteurs soumis à une submersion marine mais aussi à d'autres sources d'inondations telles que débordements de cours d'eau, zones de marais ou autres zones humides rétro-littorales réceptrices d'eaux pluviales, remontées de nappes, ruissellements...
- la détermination de zones littorales homogènes par rapport aux inondations, indépendantes les unes des autres du point de vue des inondations, parfois appelées cellules de submersion. Ainsi, toutes les submersions issues de points d'entrée d'eau distincts susceptibles de se rejoindre font partie de la même cellule de submersion ;
- la détermination des zones d'interaction entre recul du trait de côte et submersion marine, susceptibles d'être submergées du fait d'une modification de la morphologie du trait de côte ;
- la description du déroulement probable des submersions : identification des points d'entrée et écoulements ;
- la localisation des structures ou éléments participant à la protection contre la submersion marine et leurs caractéristiques : cordons naturels, cordons anthropisés, ouvrages et leur impact sur les écoulements.

3.4 - Approche historique

Les études historiques sont une étape importante pour la caractérisation d'un site. Nécessitant un investissement conséquent en temps, elles conduisent à approfondir la connaissance locale du site et des phénomènes auxquels il est soumis. Elles sont un gage certain de la crédibilité des travaux réalisés auprès des acteurs locaux, notamment par la prise en compte des connaissances et témoignages existants sur des événements ou des phénomènes dont ils conservent la mémoire.

Une attention particulière doit être portée à la définition, la traçabilité et la critique des sources. Celles-ci doivent être explicitement mentionnées. Les documents utilisés ou leur copie doivent être aisément consultables.

3.4.1 - Évolution du trait de côte

3.4.1.a - L'analyse diachronique de la dynamique côtière

Les phénomènes d'évolution, notamment d'érosion côtière, sont révélés par un constat de terrain. Il existe en effet de nombreux arguments morphologiques visibles *in situ* : falaise dunaire, démaigrissement de plage, apparition du platier rocheux ou d'alignements de dalles de beachrock (« grès de plage ») sur les plages tropicales.

Toutefois, il convient de s'assurer que les faits observés ne sont pas conjoncturels et correspondent bien à une tendance évolutive à long terme. Il s'agit principalement de comparer, à différentes dates, la position (en plan ou en profil) de la (ou des) forme(s) littorale(s) qui paraissent le mieux représenter la dynamique du milieu étudié. Pour ce faire, plusieurs méthodes et techniques de quantification de la dynamique sont utilisables. Elles diffèrent selon le type de côte (côtes basses meubles ou côtes à falaises). La méthode la plus souvent utilisée repose sur la mesure de la distance perpendiculaire ou de la surface perdue/gagnée entre les deux traits de côte.

L'étude diachronique de la dynamique côtière, qui analyse les positions de traits de côte successifs, intègre, *de facto*, l'influence de l'anthropisation, notamment la mise en place d'ouvrage ou les prélèvements de matériaux massifs en mer ou sur le littoral. Elle doit être réalisée à l'échelle de la cellule sédimentaire. Cette analyse, qui précise la fréquence et l'intensité des phénomènes historiques, nécessite de définir avec précision l'objet géographique observé, au risque sinon de comparer deux traits de côte représentant des indicateurs non comparables. Dans ce cas, les évolutions constatées ne correspondraient pas à la dynamique du littoral mais à un biais méthodologique. Par ailleurs, ce travail de quantification doit mentionner avec précision les marges d'erreur induites par la détermination de la position du trait de côte, la qualité des documents utilisés, la méthode et les techniques d'analyse retenues. Les levés de profils de plage disponibles (cf. le profil de plage 3.3.3) ou les modèles numériques de terrain sont une bonne source d'information complémentaire lors de ces analyses diachroniques.

Les changements de tendances d'évolution doivent faire l'objet d'une analyse approfondie et mis en relation avec les causes probables, actions anthropiques notamment.

3.4.1.b - L'estimation des vitesses et des rythmes d'évolution

L'estimation des vitesses de recul du trait de côte est traduite par un ou des documents cartographiques. L'échelle de restitution doit être la plus fine possible et ne pourrait être inférieure au 1/10 000. Les vitesses moyennes annuelles sont déterminées par comparaison des positions du trait de côte à des dates différentes. Les états connus doivent être séparés d'un pas de temps le plus large possible (au moins pluri-décennal), afin de disposer d'une réelle représentativité temporelle. Cette approche sur le long terme est fondamentale car elle permet de s'assurer que les vitesses de recul calculées ne sont pas exacerbées par un événement ponctuel important (un temps fort de la dynamique), ou au contraire minimisées, en raison de la prise en compte d'une période correspondant à un temps « mort » de l'érosion. Les positions observées doivent faire l'objet d'une analyse attentive. Lorsque les états connus sont en nombre suffisant, des informations peuvent être fournies sur les rythmes d'évolution du trait de côte, sur sa variabilité spatiale (« degré de liberté » du rivage) et sur les tendances de long terme.

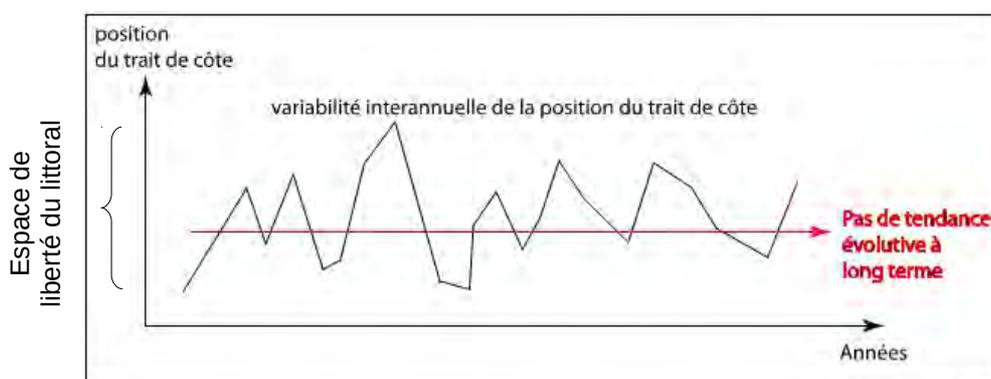


Illustration 21 : Variabilité inter-annuelle de la position du trait de côte délimitant l'espace de liberté du littoral

Dans le cas des falaises, la définition d'une période de retour des phénomènes peut être envisagée. Ainsi, il est possible de fournir des éléments de connaissance sur la durée du « cycle d'évolution des falaises » : effondrement, déblaiement, érosion de la paroi, effondrement au même endroit. Ceci suppose qu'un inventaire des effondrements observés soit disponible et que les événements mentionnés soient datés et localisés avec une précision suffisante.

L'analyse de l'impact des ouvrages de protection et aménagements implantés sur le littoral est nécessaire. Elle demande une connaissance fine de l'historique de l'implantation des ouvrages sur la période d'analyse et de leur impact hydro-sédimentaire.

Encart 9 : Analyse des évolutions de la position du trait de côte **Types de sources de données**

Pour remonter dans le temps, et connaître l'évolution du trait de côte, de nombreuses sources de données et des méthodes complémentaires existent :

- Les **documents anciens** (cartes de Cassini, d'Etat Major, de Beauteemps-Beaupré...) sont souvent riches d'informations. Cependant, ces derniers ne fournissent que des informations qualitatives, ou parfois, des ordres de grandeur pour des formes littorales. De même, la comparaison de feuilles cadastrales, dont les premières ont été dressées au XIX^e sur ordre de Napoléon I^{er}, et réactualisées jusqu'à nos jours, est une technique souvent utilisée malgré leur précision relative. Ces documents jouissent d'un détail important (échelle de 1/1 000 à 1/2 500). La superposition des documents représentant l'ensemble des parcelles imposables montre souvent un bon calage de ces dernières. Malheureusement, aucune information n'est fournie

quant aux modalités de détermination de la position exacte du trait de côte. Néanmoins, ces documents fournissent des éléments d'information pertinents, notamment dans les secteurs anciennement urbanisés (cf. Illustration 22).

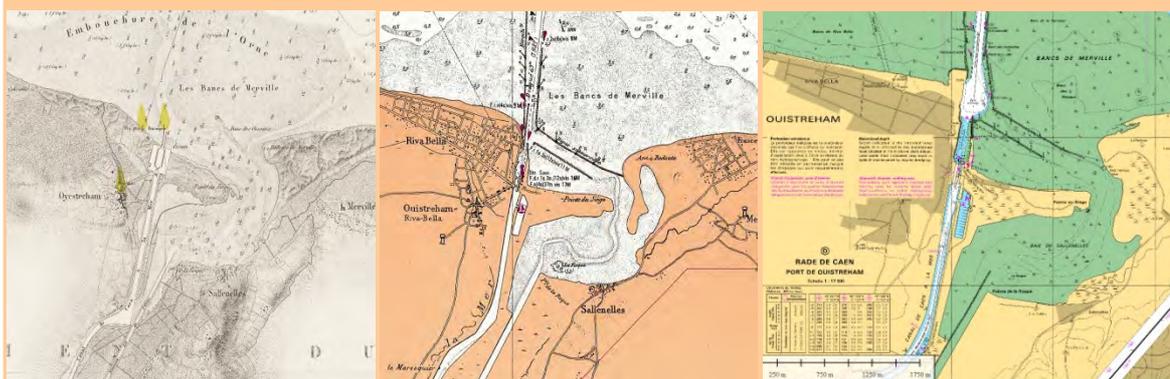


Illustration 22 : Évolution du trait de côte à partir des cartes marines du port de Ouistreham archivées au SHOM

Carte particulière des côtes de France de dépôt général de la marine 1839

Carte SHOM, édition 1954

Carte SHOM, édition 2011

- Les **photographies aériennes obliques** et les **cartes postales** ne sont pas dénuées d'intérêt, même si, là aussi, les informations livrées sont souvent qualitatives.
- Les **photographies aériennes verticales** (IGN, SHOM et autres opérateurs) sont des documents très souvent utilisés pour l'analyse de la dynamique du trait de côte. Cependant, ces dernières nécessitent le redressement des clichés (réalisation d'ortho-photographies) sans lequel les comparaisons seraient erronées. Parmi les ortho-photographies, on peut citer l'Ortho Littorale, libre de droits, faisant l'objet d'actualisations par le MEDDE.
- Des techniques plus récentes de levés topographiques (satellites, photogrammétrie, laser aéroporté -LIDAR-, dGPS) donnent des informations numériques et géoréférencées d'une grande précision. Alors que la marge d'erreur des résultats issus de l'utilisation des photographies aériennes, même redressées, est plurimétrique, ces techniques, telles que les levés photogrammétriques effectués à partir de photographies à grande échelle, et surtout les levés laser aéroportés, fournissent des données dont la marge d'erreur en latitude, longitude, et altitude est infra-décimétrique. Ces levés permettent des analyses fines de l'évolution du trait de côte (cf. Illustration 23).

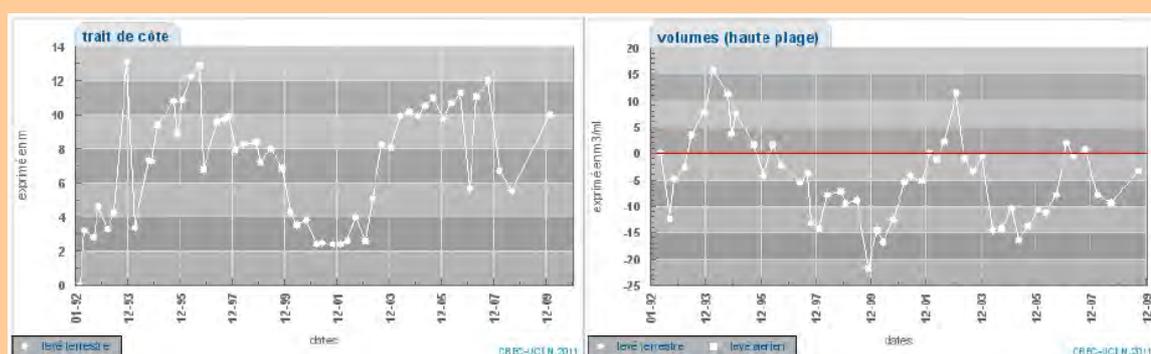


Illustration 23 : Variabilité inter-annuelle et tendance sur 18 ans (1992-2009) de la dynamique côtière le long d'un profil de plage au droit de Coutainville (Ouest Cotentin, Manche).
Levé des profils au tachéomètre. Position du trait de côte (A), et volume sédimentaire de haut de plage (B).
(Source : M2C-CREC, CNRS-UCBN).

Il convient de prêter la plus grande attention à ces moyens d'investigation qui n'ont pas tous la même précision (manque de repère, systèmes de référence différents, échelles de temps et spatiale diverses, témoignages partiels...).

3.4.2 - L'inventaire des submersions marines historiques

Cet inventaire a pour objet de rassembler et d'analyser une documentation aussi complète que possible permettant de caractériser les événements tempétueux ayant affecté le secteur d'étude. Cette étude doit s'attacher à la description des phénomènes survenus, des désordres et dommages qu'ils ont occasionnés et des conditions à l'origine de leur manifestation. Elle doit s'appuyer sur des analyses spatio-temporelles combinant des frises historiques et des cartographies mettant en évidence les informations disponibles et les évolutions constatées (cf. Illustration 24). L'élaboration d'un historique des événements tempétueux est une opération extrêmement longue et méticuleuse. Pour être complète, elle repose sur des recherches couvrant au moins les 3 derniers siècles. Elle s'appuie sur les données et les indices retrouvés auprès de différents organismes et s'attache à recouper les informations collectées.

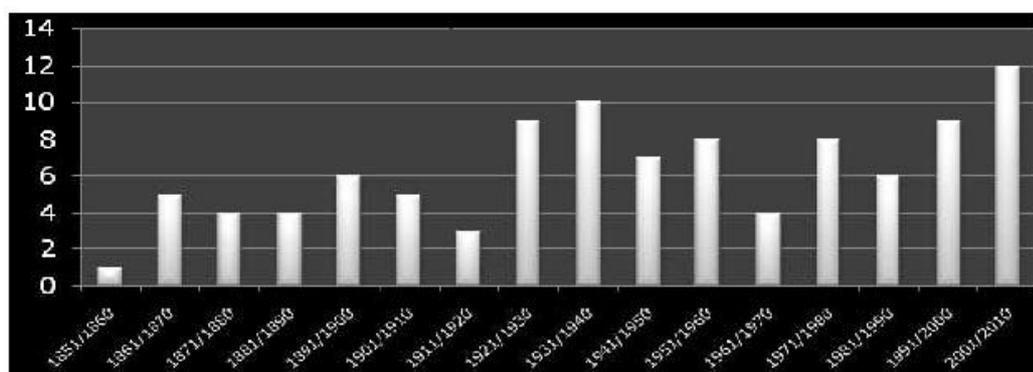


Illustration 24 : Nombre de tempêtes et de forts coups de vent recensés depuis le milieu du XIX^{ème}s. ayant occasionné des dommages sur le littoral morbihannais

Extrait de l'étude DHI/Géos-AEL (2011) – Atlas des risques littoraux du Morbihan, DDTM 56.

Ce recensement des tempêtes a quatre objectifs principaux :

- localiser les secteurs exposés à l'inondation par la mer ;
- recueillir les paramètres météo-marins conditionnant ces inondations : dépression atmosphérique (direction, vitesse de déplacement, pression), hauteur du plan d'eau (coefficient de marée et surcote), vent (vitesse, direction, durée d'action), houle (hauteur, période et direction)... Ces informations sont utiles à la construction d'éventuels modèles numériques ;
- recueillir les paramètres morpho-sédimentaires conditionnant ces inondations : reculs du trait de côte, abaissement de la cote de crête des cordons, brèches dans les cordons naturels, autres évolutions morphologiques constatées ;
- garder la mémoire des tempêtes, menacées d'oubli, et développer une culture du risque par une large sensibilisation de la population.

Encart 10 : Recensement et analyse des tempêtes historiques - Sources de données

Archives du Service Historique de la Défense, archives départementales (notamment les archives des Services Maritimes des Directions Départementales des Territoires et de la Mer), archives communales (notamment les registres de délibération des conseils municipaux), archives d'exploitants locaux (marais salants...), archives de la presse locale, archives de Météo-France (notamment les observations des sémaphores locaux), du SHOM, BDHI (cf. Encart 11), réanalyses des situations météorologiques (notamment modèles NCEP et ECMWF), Observatoire de Paris, associations, sociétés savantes locales...

En général, les archives consultées mentionnent et décrivent uniquement les événements ayant occasionné des dommages sur des secteurs à forts enjeux, ce qui explique le peu d'information dans les secteurs nouvellement urbanisés. Les conséquences peuvent également être repérées sur des secteurs proches présentant des enjeux. Ces événements dommageables sont recensés de manière plus systématique à partir de la seconde partie du XX^{ème} siècle, en raison d'une urbanisation et d'une présence humaine plus significative sur le littoral. Les archives relatant les tempêtes et leurs conséquences sont extrêmement rares avant 1850. Dans tous les cas, il existe très peu d'informations précises sur les périmètres des zones inondées.

Encart 11 : Base de Données des événements Historiques d'Inondation (BDHI)

En introduisant la nécessité de se référer désormais explicitement au passé dans l'évaluation des risques d'inondation, la directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007, relative à l'évaluation et à la gestion des risques inondation, engage à prendre en compte les données sur les événements passés, que ceux-ci soient très anciens (plusieurs siècles) ou très récents (quelques mois, quelques années). Dans ce contexte, la France entend mettre en œuvre une politique d'encadrement de ces données, ce qui implique que les informations sur les événements à venir soient intégrées aussi au processus global de conservation, de validation et de valorisation des informations du passé.

L'objectif de cette base est de décrire les inondations marquantes du passé (au moins les 50 dernières années). La chronique non exhaustive des principaux événements passés qui ont marqué le territoire et l'évolution de la politique de gestion des inondations sur le district hydrographique concerné ou pour la France est ainsi réalisée. Sont recensées les caractéristiques des principales inondations du passé qui ont eu un impact appréciable ou une intensité remarquable.

Une fiche peut être établie pour chaque tempête identifiée (cf. Illustration 26), mentionnant dans la mesure du possible les informations suivantes, en cohérence avec la BDHI :

- les dates de début/fin de l'événement et/ou sa durée ;
- une analyse météorologique de l'événement tempétueux ;
- sa localisation : la ou les communes touchées, les secteurs impactés (étendue de la zone inondée, linéaire côtier impacté, lieux-dits concernés...) ;
- le type d'inondation : submersion marine exclusivement ou concomitance avec d'autres origines d'inondation telles que débordement de cours d'eau, ruissellement, remontée de nappe phréatique... ;
- le (ou les) type(s) ou mode(s) de submersion marine : débordement, brèche/rupture dans un cordon naturel ou un ouvrage, franchissements par paquets de mer ;
- les conditions météo-marines correspondantes : niveau marin (coefficient de marée et surcote), orientation et force du vent, axe de déplacement et autres caractéristiques de la dépression atmosphérique, agitation du plan d'eau (dans le cas d'estuaires ou de lagunes, l'agitation du plan d'eau interne est également à prendre en considération), durée d'action des tempêtes ou des coups de vent (nombre de jours) ;
- la période de retour de l'événement ou une fourchette dans laquelle elle est comprise ;
- les caractéristiques hydrauliques de la submersion : extension, points d'entrée, principaux axes d'écoulement, hauteurs constatées, zones d'écoulement fort, axes d'évacuation ;
- l'impact hydraulique des ouvrages et autres obstacles à l'écoulement ;
- les conséquences de l'inondation sur :
 - les évolutions constatées du trait de côte : recul, brèches dans les cordons ;

- les dégâts et dommages sur les ouvrages de défense ;
- les dommages sur l'habitat (nombre de logements inondés), les infrastructures (routes, voies ferrées, aéroports, centrales électriques...), l'activité agricole (élevage, cultures, forêts, extraction minière, pêche), l'activité économique hors agricole (usines, constructions, services, commerces...), les constructions autres (patrimoine culturel...) ;
- la santé humaine et la société : décès et personnes disparues, personnes évacuées, services publics mis hors d'usage ;
- l'environnement : pollution de l'eau ou de l'air, dommages sur le sol, la faune et la flore ;
- les illustrations relatives au site : cartes postales, photographies, plans, croquis...
- les différentes sources des informations recueillies.

Ces informations sont si possible à géolocaliser, de manière ponctuelle (cf. Illustration 25) ou surfacique, afin de faciliter les analyses.

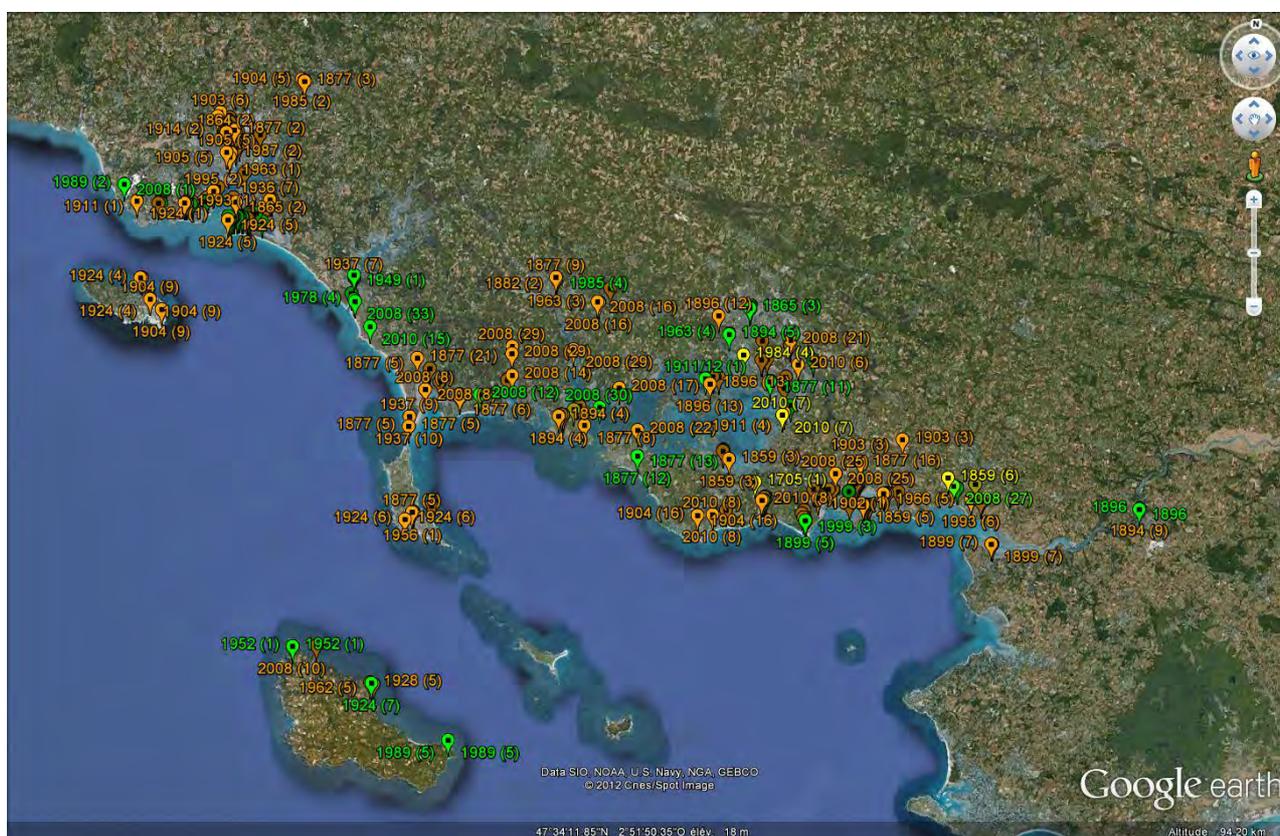


Illustration 25 : Submersions marines historiques sur le littoral Morbihannais entre 1705 et 2010
Localisation très approximative à l'échelle de la commune en jaune, approximative à l'échelle du lieu-dit en orange, précise au niveau du secteur impacté en vert (Extrait de l'étude DHI – Géos-AEL, 2011)

Les événements historiques pour lesquels de nombreuses données sont disponibles, pouvant le cas échéant être utilisés comme événements de calage, sont à identifier.

17 au 19 mars 1866 et 7 au 8 janvier 1867 | Gâvres | n°31

► Source : Service Historique de la Marine (Plan des salines de Gâvres et de Kersabu)



Dégradações faites par les marées (du 17 au 19 mars 1866 - teinte violette, du 7 au 8 janvier 1867 - teinte jaune)

- Dégradations faites aux chemins de l'embarcadere à la batterie, aux vieilles digues, aux nouvelles digues, à l'enracinement où a été construit l'entrée du (illable)
- Brèche faite dans la nouvelle digue de Kersabu, brèche faite dans la ligne du chemin de fer
- Ensablement sur la ligne du chemin de fer
- Dégradations faites au mur à pierres sèches construit sous la palissade de clôture de la batterie
- Affaiblissement produit par la mer au pied du mur de soutènement
- Démolition de l'encrochement construit au pied de ce mur
- Légères dégradations faites dans la dune par le passage de la mer dans l'anse de la balistique
- Coupure faite dans le chemin qui longe la batterie
- Brèche faite dans la dune de la balistique auprès de la cale du chemin de fer
- Affaiblissement produit par la mer à l'Est de la cale

► Source : Mairie de Gâvres
Lors de la réunion du Conseil Municipal du 1^{er} septembre 1867, le maire rappelle que l'hiver précédent, la filaise s'était effondrée : « le conseil fait observer que la commune de Gâvres est devenue une île par suite de la coupure faite en hiver dernier dans la filaise par la mer »

► Source : SHOM
Coefficients des marées :
Le 17 mars 1866 : 108 le matin et 111 le soir
Le 18 mars 1866 : 114 le matin et 114 le soir
Le 19 mars 1866 : 113 le matin et 111 le soir
Le 7 janvier 1867 : 98 le matin et 100 le soir
Le 8 janvier 1867 : 101 le matin et 101 le soir

1 et 2 février 1904 | Belle-Ile-en-Mer | n°31

► Source : Courrier Morbihannais, article du 7 février 1904
« Le Palais. Depuis huit jours, nous avons eu un temps détestable. Le vent, la pluie, la grêle se succèdent avec un en train déconcertant, et il n'est pas rare de voir les éclairs et le tonnerre se mettre de la partie. La mer, toujours grosse, balaye sans cesse nos côtes et fait rage dans le port. Le ressac est tellement fort que les bateaux et les vapeurs ne peuvent que difficilement accoster les quais.
Mardi matin, à l'heure de la pleine mer, l'eau a débordé de toutes parts sur les quais et un grand nombre de maisons ont été inondées. Il a fallu faire appel aux pompes à incendie pour vider les caves et les sous-sols d'un grand nombre de magasins et de maisons particulières. [...] Les quais sont endommagés dans les différents endroits du port. »

► Source : Le morbihannais, article du 7 février 1904
« A la suite de la dernière tempête, la jetée établie au Port-Blanc, pour le service du canot de sauvetage de Locmaria, en Belle-Ile, a été démolie en grande partie. »

► Source : Le Nouvelliste du Morbihan, article du 7 février 1904
« A Belle-Ile, les quais du port de Palais ont été envahis par l'eau sur le quai Gambetta. Il a fallu recourir aux pompes municipales pour vider les caves. »

► Source : Collection CARTOPOLE de BAUD (S6) - www.cartopole.org
Cartes postales anciennes non datées mais se rapportant sans doute à l'événement de février 1904




► Source : SHOM
Coefficients des marées :
Le 1^{er} février 1904 : 93 le matin et 103 le soir
Le 2 février 1904 : 108 le matin et 111 le soir

31 janvier, 1^{er} et 2 février 1953 | DUNKERQUE – CANAL EXUTOIRE | n°29

Source(s) : Le Nouveau Nord – 3 février 1953

Données météo-marines :
Coïncidence de fortes marées avec une violente tempête de Nord et Nord-Est. Dans la nuit du samedi 31 janvier au dimanche 1^{er} février, entre 2h et 2h30, la marée qui devait normalement atteindre 5,60 m s'est trouvée portée par une formidable poussée d'eau, à 2,40 m de plus que sa cote normale, soit 8 m.
(NN 4/2/53 : Lors de la catastrophe qui se produisit dans la nuit du 1^{er} au 2 mars 1949, la hauteur d'eau maximum enregistrée avait été de 7,15m/7,20m.)

Dégâts occasionnés : Rupture de digue

Observations complémentaires :
Le processus de la catastrophe de mars 1949 s'est déroulé avec plus de gravité encore. La digue étant presque submergée, les vagues se sont acheminées comme des béliers sur le petit extérieur démantelant les parties faibles. L'eau s'engouffrait dans les poches ainsi créées, fouilla et envahit le sable ; en deux points la digue se « vida » de sa substance et les superstructures de maçonneries s'effondrèrent ; la mer se ruant avec furie dans les passages ainsi creusés, emportant tout de sa masse, broyant la maçonnerie, bousculant la bécaille, nettoyant le sable. Le travail de pilonnage effectué par les vagues montantes fut complété par l'œuvre de sappe et de fouille accomplie par la marée descendante, et celles qui allaient suivre. A 2h30 par deux larges brèches, la mer avait envahi le canal exutoire (...). En peu de temps, le pont de Rosendaël fut submergé, l'eau envahit la cité du stade Tribut et les rues des quartiers limitrophes de Dunkerque et de Rosendaël, inondant les caves, les jardins, dépassant le niveau des rez-de-chaussée des immeubles.
Très rapidement de l'eau salée commença à s'écouler dans l'avenue Foch, dans la rue des Corderies, remonta vers le canal de Fumes et s'arrêta à une dizaine de mètres de celui-ci. Mais en même temps, l'eau avait pénétré profondément dans les propriétés de jardiniers, inondant entièrement serres et jardins.
(...) les berges du canal exutoire protégeant la cité de baraquements du Stade tribut furent bientôt incapables de contenir le flot. Subitement, tandis qu'une grande partie de l'avenue Foch se trouvait déjà sous les eaux, les berges débordèrent sous les yeux des riverains angoissés. Avec une extrême rapidité, l'eau progressa dans les allées, cerna les baraques.
(...) La cité Tribut, complètement submergée, l'eau salée remonta la rue Paul-Dufour où elle envahit toute les caves et tourna à gauche dans la rue du Général De Gaulle, pour faire sa jonction avec les eaux de la rue des Corderies. Après l'étal, vers 14h50, les eaux commencèrent à se retirer, puis disparurent entièrement dans la soirée, des chaussées.
La marée de la nuit de dimanche 1^{er} à lundi 2 mars ne provoqua pas d'inondations, le vent s'étant calmé. La marée du lundi 2 mars à 15h00, dont la cote prévue était de 5,50 m n'a pas renouvelé les inondations catastrophiques du dimanche après-midi. Dans les quartiers du Stade-Tribut et des Corderies, l'eau n'est pas montée dans les rues ni autour des baraquements, bien que certains jardins et terrains soient restés submergés depuis la veille. Certaines parties basses de la rue Paul-Dufour et d'autres artères sont restées légèrement couvertes d'eau. Au pont de Rosendaël, l'eau n'a pas atteint le platelage. Le niveau se maintenant à l'étal, à environ 70cm du bord des berges.
La nuit de dimanche 1^{er} au lundi 2 mars a été plus calme et l'eau n'a pas atteint un niveau aussi élevé, puisqu'au pont de Rosendaël, elle n'a fait qu'affleurer. Le vent qui souffle du NE va mollissant et on estime que la grand marée de 5,60 m prévue pour la nuit de lundi à mardi ne peut donner lieu à de nouvelles inquiétudes.

26, 27 et 28 février 1990 | WISSANT | n°52

Source(s) : Olivier Beaulieu (Eden 62), Conservatoire du Littoral, DDE Boulogne-sur-Mer, SMB/C, S. Chaverot

Données météo-marines :
Des la nuit du 26 février, le vent a soufflé avec violence. On enregistrait des pointes à 137 km/h à Boulogne/Mer à 9h00 le matin et 151 km/h au Gris-Nez ; au cours des jours suivants, on enregistrait à Boulogne/Mer 115 km/h le 27 et 144 km/h le 28
A Boulogne/Mer
Le 26/02 : marée haute à 12h00, coeff 108, perturbation orientée W puis WSW
Le 27/12 : marée haute à 0h, coeff 108, vent de WSW
Le 27/12 : marée haute 12h00, vent d'W
Tableau des observations aux marégraphes de Boulogne/Mer et de Calais (source SMB/C). Le 27/12, il a été observé une cote de 10,90 à Etaples/Mer pour une cote prévue de 9,30, soit 1,60 m de surcote. La cote 8,10 observée au marégraphe de Calais correspond à une fréquence décennale pour le niveau de marée, surcotes incluses, observée au port de Calais.

DATE	BOULOGNE			CALAIS				
	heure	cote prévue (m)	cote observée (m)	écart (m)	heure	cote prévue (m)	cote observée (m)	écart (m)
26/02/90	0830	8,75	8,85	0,10	0830	7,10	7,10	0,00
26/02/90	13H	9,05	9,55	0,50	13H00	7,30	7,60	0,30
27/02/90	1015	9,00	9,90	0,90	1H	7,25	8,10	0,85
27/02/90	13H20	9,20	9,85	0,65	13H	7,40	8,00	0,60
28/02/90	1050	9,05	9,60	0,55	1030	7,30	8,00	0,70
28/02/90	13H50	9,20	9,80	0,60	13H40	7,40	7,95	0,55
01/03/90	2H20	9,00	9,40	0,40	2H30	7,25	7,80	0,55

Le 27 février, il a été observé une cote de 10,90 à ETAPLES-SUR-MER pour une cote prévue de 9,30, soit 1,60 m de surcote.

Dégâts occasionnés : Rupture du cordon dunaire

Observations complémentaires :
Formation d'une brèche dans le cordon dunaire de la dune d'Aval, le 26 février, lors de la marée haute de 13h00. Cette photographie a été prise par Olivier Beaulieu (Eden 62), garde sur le terrain du Conservatoire du Littoral.



Illustration 26 : Exemples de fiche-tempête :
En haut, extraits de l'Atlas des risques littoraux du Morbihan, DDTM du Morbihan (DHI/Géos-AEL, 2011) ;
en bas, extraits de l'étude Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique sur le littoral de la région Nord-Pas-de-Calais, DREAL Nord-Pas de Calais (DHI/Géos-AEL, 2009)

3.4.3 - L'évolution de l'occupation humaine : modes d'urbanisation et occupation du sol

La dynamique du paysage côtier est fortement liée à l'action de l'homme qui a modifié les équilibres naturels. Une reconstitution des évolutions morphologique et anthropique du rivage, dans le temps et dans l'espace, peut être réalisée par une analyse documentaire. Cette analyse devra mettre en évidence les grandes étapes de l'occupation humaine, ainsi que son impact sur le milieu.

Encart 12 : Analyse de l'évolution de l'occupation humaine : Sources d'information disponibles

Elles sont les mêmes que pour l'analyse diachronique de l'évolution du trait de côte : archives communales et départementales, archives des Directions Départementales des Territoires et de la Mer, du Service Historique de la Défense et de la Bibliothèque Nationale, du SHOM, photothèque et cartothèque de l'IGN, Inventaire Permanent du Littoral (IPLI), cartes postales et photographies anciennes, cartes et plans anciens, etc.

En général, on observe :

- jusqu'au XIX^{ème} siècle, une présence humaine qui se traduit, soit par des implantations ponctuelles, modestes (moulins à marées, marais salants, pêcheries, sites portuaires dans les secteurs abrités, sites fortifiés, hameaux, etc.) soit au contraire par des opérations de grande envergure (poldérisation) visant à gagner des terres agricoles sur de vastes surfaces (Vendée, Charente-Maritime, Nord-Pas-de-Calais...).
- à partir du XIX^{ème} siècle, le littoral devient particulièrement attractif et connaît un essor démographique considérable. Des aménagements structurants sont réalisés : routes, chemin de fer, canaux, équipements portuaires -le bassin à flot remplace le bassin d'échouage-, les phares et balises améliorant la sécurité en mer. Des activités spécialisées se développent comme la conchyliculture, la pêche et les conserveries, la construction navale, le commerce et l'industrie, ainsi que le développement de stations balnéaires et de villégiature : maisons cossues et manoirs prennent naissance.
- à partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, l'attractivité du littoral se renforce. Il devient un espace extrêmement convoité. C'est le temps du glissement de l'urbanisation vers le rivage, des activités portuaires industrielles ou de plaisance, du tourisme de masse, de la forte consommation d'espace liée au développement des résidences secondaires, de l'assèchement de marais rétro-littoraux, de l'artificialisation du trait de côte. C'est, en contre-point, celui de la protection foncière des espaces naturels menacés, de la limitation de l'étalement urbain et de la restauration des sites naturels intensément fréquentés (opérations de « canalisation » du public, mise en défens des secteurs dunaires...) assurée par les collectivités territoriales, le Conservatoire du Littoral et l'ONF (dunes domaniales), et de l'action réglementaire : loi littoral, classement européen des zones Natura 2000...

Il apparaît essentiel de retrouver la mémoire d'un site, de s'imprégner de son histoire, non seulement pour comprendre l'évolution croissante de sa vulnérabilité, mais également pour restituer cette connaissance lors des réunions de sensibilisation de la population et des élus, organisées lors de l'élaboration du PPRL.

Il s'agit ici de mettre en parallèle les différents historiques :

- de l'évolution du littoral et de la morphologie côtière ;
- de l'implantation humaine sur la frange côtière, ses raisons et ses conséquences sur l'évolution du littoral (extractions, fréquentation, modification des écoulements terrestres et souterrains...) ;
- de l'artificialisation du trait de côte : l'implantation d'ouvrages sur le littoral a inévitablement une influence sur l'évolution du système littoral, la mobilité intrinsèque des formes littorales venant se confronter à la présence d'ouvrages anthropiques. Les effets de ces derniers peuvent être immédiats ou plus souvent différés dans le temps suivant des temporalités éminemment variables et propres à chaque site ;
- des tempêtes et coups de vent à l'origine de dommages : érosion et recul du trait de côte, submersion, dégâts aux ouvrages.

Encart 13 : Evolution de la Presqu'île de Gâvres - Pays de Lorient – Morbihan
Extrait de l'étude d'aléa submersion marine sur le site de la grande plage de Gâvres
(DHI/GEOS, 2007)

Trois périodes caractéristiques de l'évolution du littoral et de l'occupation humaine se distinguent (Peeters *et al*, 2009) :

Jusqu'au début du 19^{ème} siècle, un milieu dunaire et lagunaire peu attractif

Les zones d'habitat (Porh Guerh, au sud-est de la presqu'île, et Kersahu, au nord du cordon reliant la presqu'île à la côte à l'est) sont localisées près des secteurs d'accostage les plus accessibles, les plus protégés des vents d'Ouest. Les cordons littoraux connaissent alors les conditions d'un fonctionnement « naturel », un équilibre fluctuant qui se traduit par une modification permanente du trait de côte.

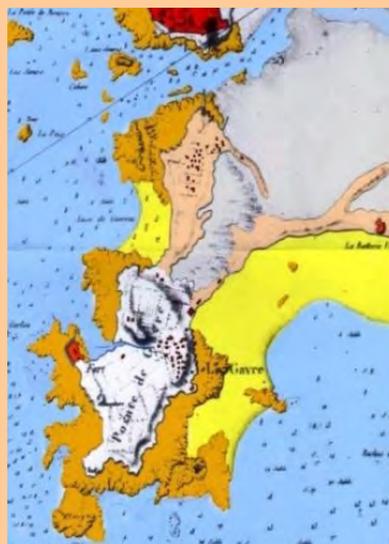


Illustration 27 : Cartes historiques de Gâvres d'après Saint-Pierre (1758) et Beautemps-Beaupré (1809)

Sur la carte de Saint-Pierre (1758), on observe la présence de deux brèches dans le tombolo qui se sont sans doute créées sous la pression de tempêtes successives. La rupture du cordon et le refoulement des sables en arrière dans la Petite Mer de Gâvres ont entraîné la formation d'un îlot allongé de direction E-W. Sur la carte de Beautemps-Beaupré (1809), le cordon s'est reconstruit. Sous l'influence du courant de flot et des vents dominants, les deux brèches se sont comblées par l'accumulation du sable de plage, tandis que l'îlot sableux s'est progressivement soudé au tombolo pour former un cordon dunaire de direction SE-NW.

Conséquences de la tempête de Janvier 2001



*Illustration 30 : Conséquences des tempêtes du 10 janvier 2001
(Extrait du Ouest-France, article du 11 janvier 2001) et du 10 mars 2008 (Photo : GEOS AEL)*

3.5 - Synthèse de l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral : identification des facteurs à l'origine des aléas littoraux

L'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral doit permettre de déterminer les aléas à traiter et les principaux facteurs à l'origine de chaque aléa et de définir précisément le bassin d'étude des aléas. Elle apporte les éléments nécessaires au choix des hypothèses à retenir et des méthodologies à mettre en œuvre pour la caractérisation des aléas. À la fin de cette première phase, une fois les aléas à étudier identifiés, il est nécessaire de synthétiser l'ensemble des résultats qui sont directement exploités dans la phase 2 de l'étude d'aléa.

Ainsi, dans la phase d'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral, le niveau d'étude à conduire dépend des analyses attendues en fin de phase 1, décrites ci-dessous, et de la bibliographie existante.

3.5.1 - Le recul des côtes rocheuses et à falaises

Le recul des côtes rocheuses s'effectue sur des pas de temps relativement longs, généralement pluri-décennaux. Cette dynamique régressive revêt un caractère discontinu dans l'espace et ponctuel dans le temps. Préalablement à la caractérisation de l'aléa recul du trait de côte pour ce type de côte, il apparaît par conséquent nécessaire d'établir une synthèse des analyses effectuées. Cette synthèse aborde les points suivants :

- définition des types de mouvements en présence, écoulement/éboulement ou glissement ;
- recensement des événements significatifs et de leurs caractéristiques ;
- association de la mesure de l'évolution du trait de côte à long terme et de l'inventaire des mouvements ponctuels quel que soit le type de mouvement ;
- analyse du phénomène de recul au regard de l'action combinée des facteurs marins et continentaux ;
- détermination des zones qui ne sont pas directement soumises à l'aléa recul mais où certains aménagements ou activités pourraient l'aggraver ou l'initier (du fait des infiltrations notamment).

3.5.2 - Le recul des côtes basses meubles et la migration dunaire

Les formes d'accumulation connaissent alternativement des périodes d'engraissement, appelées aussi périodes d'accumulation ou de progradation, et de démaigrissement, ou érosion. Les processus d'évolution de la côte sont continus et entraînent le remodelage du trait de côte à des échelles de temps géologiques, saisonnières (phases d'accrétion et d'érosion) et ponctuelles lors d'événements tempétueux. Pour appréhender l'évolution du trait de côte, il convient d'intégrer ces différents pas de temps pour chacun des processus à l'œuvre. Il convient de rappeler que la mobilité spatiale intrinsèque, « degré de liberté » du littoral, ne doit pas être confondue avec la tendance évolutive à long terme. Une analyse des évolutions à long terme (échelle historique) et à court et moyen terme est donc nécessaire.

La synthèse de l'évolution des côtes basses meubles, nécessaire avant la phase de caractérisation des aléas recul du trait de côte et migration dunaire, consiste en :

- l'analyse de l'évolution du trait de côte à long terme et au cours d'événements ponctuels (analyse des positions successives du trait de côte et du front dunaire le cas échéant) ;
- l'analyse de l'évolution des morphologies associées à l'évolution de la position du trait de côte (cordons naturels, plages...) ;
- l'identification des zones d'accumulations sédimentaires fortement mobiles (flèches, cordons...) ;
- l'analyse des transits sédimentaires en lien avec les facteurs de forçage et des volumes sédimentaires en jeu ;
- la synthèse de la dynamique sédimentaire, y compris l'impact des ouvrages, à l'échelle d'une cellule sédimentaire, et si nécessaire des cellules adjacentes ;
- l'analyse du phénomène de recul au regard de l'action combinée des facteurs marins et anthropiques, visant à l'identification des principaux facteurs à l'origine de l'évolution du trait de côte ;
- l'analyse, au regard des points précédents, de la représentativité des tendances passées par rapport aux tendances futures (impacts des ouvrages, stocks sédimentaires disponibles...) ;
- la détermination des zones qui ne sont pas directement soumises à l'aléa recul mais où certains aménagements ou activités pourraient l'aggraver ou l'initier (cordons naturels végétalisés notamment).

3.5.3 - La submersion marine

L'analyse des inondations par la mer s'appuie sur la confrontation de trois types de données : (1) les indices ayant trait aux événements passés, (2) les conditions météo-marines, (3) la morphologie des lieux. Une synthèse du phénomène de submersion marine, par l'analyse des différents types d'informations recensées, est nécessaire avant la phase de caractérisation. Elle consiste à identifier :

- la description du fonctionnement hydraulique du site et du déroulement des submersions (passées ou probables) : points d'entrée et écoulements ;
- par secteur, les modes de submersions historiques : débordement, franchissements par paquets de mer, rupture d'ouvrage ou de structure naturelle ;
- à partir des événements historiques, les phénomènes naturels autres que les niveaux marins hauts (houles, débits de cours d'eau, précipitations, remontée de nappes, etc.) à prendre en compte dans l'événement de référence ;
- la liste des événements historiques susceptibles d'être événements de référence ;
- les événements pouvant si nécessaire être utilisés pour le calage de modèles ;
- les interactions entre recul du trait de côte et submersion marine ;
- la localisation des structures participant à la protection contre la submersion marine et leurs caractéristiques : cordons naturels, cordons anthropisés, ouvrages et leur rôle ;
- la détermination des zones qui ne sont pas directement exposées à la submersion marine mais où certains aménagements ou activités pourraient aggraver l'aléa ou induire une nouvelle zone soumise à aléa (cordons naturels végétalisés ayant un rôle de protection contre la submersion notamment).

3.5.4 - Résultats attendus

Les résultats obtenus après la phase d'analyse générale du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude. Il récapitule :

- la liste des données recensées, les contacts pris, les sites internet consultés, etc.,
- la bibliographie comprenant le recensement exhaustif des études menées sur le site auparavant,
- la synthèse des principaux résultats de la bibliographie,
- les analyses complémentaires menées.

Un cahier de cartes de synthèse (à des échelles du 1/10 000 ou 1/100 000) peut être établi. Il comprend :

- les cartes anciennes recensées,
- une carte géologique,
- une carte identifiant l'ensemble des sédiments meubles mobilisables à partir des cartes géologiques et des cartes anciennes,
- une carte des phénomènes naturels : principales directions de propagation des houles, zones fortement exposées à la houle, principales zones soumises aux franchissements, zones basses (superposition topographie/niveau marin de référence), localisation et cote des points bas,
- une carte de l'évolution du trait de côte : positions successives, dates d'implantation des ouvrages, sens du transit littoral, risque de rupture des cordons naturels,
- une carte des ouvrages et structures de protection : localisation des ouvrages, type d'ouvrage,
- une carte de synthèse des événements historiques : localisation des zones inondées par événements, des principaux dégâts sur les ouvrages, des brèches historiques, des principaux reculs ;
- une carte de synthèse des zones qui ne sont pas directement soumises aux aléas mais où certains aménagements ou activités pourraient aggraver les aléas ou en initier de nouveaux.

4 - Conclusion

L'analyse générale du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral est un moment privilégié dans l'élaboration d'un PPRL. De manière immédiate, c'est une rencontre avec les réalités d'un territoire. Appréhender son fonctionnement tant du point de vue de ses dynamiques naturelles que de l'impact des activités humaines est un exercice délicat. Ainsi le littoral n'est pas une ligne mais une large bande qui s'étend en mer et jusqu'à l'intérieur des terres. Quelles que soient les zones à étudier, qu'elles paraissent d'un fonctionnement simple à appréhender, ou que celui-ci semble plus complexe, le temps à accorder à cette étape ne doit pas être sous-estimé.

Cette analyse assoit également la crédibilité de l'ensemble de l'étude. Pour accroître la fiabilité des tendances mises en évidence, l'identification, l'association et la concertation avec les acteurs locaux doit rythmer la progression de l'étude. En effet, les données à même d'apporter des éclairages pertinents sont souvent de nature diverse (chroniques de mesures, cartographies, témoignages, photographies, etc). Par conséquent, elles sont disponibles auprès d'interlocuteurs variés.

Le fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral appréhendé, il s'agit, ensuite de le replacer dans le cadre plus large du PPRL. La réduction des risques littoraux recherchée par ces plans nécessite cette rigoureuse qualification pour mener à bien, par la suite, la quantification des risques. Seule cette connaissance permettra d'établir les mesures adaptées et réalistes susceptibles de réduire la vulnérabilité des populations et diminuer les dommages aux biens.

La méthodologie développée lors de l'élaboration d'un PPRL est un exercice rigoureux dont la portée est majeure. Elle fait se confronter de nombreuses échelles spatiales et temporelles. Spatialement, il est nécessaire de définir l'échelle pertinente non pas d'un point de vue administratif mais au regard de l'emprise des processus naturels susceptibles d'avoir un impact sur la population. De la même manière, l'aspect historique de l'étude visant à revenir sur les événements majeurs est fondateur d'une meilleure compréhension de la situation actuelle. Ces événements antérieurs appréhendés avec toute la précision nécessaire seront le socle de scénarios prospectifs.

Ces scénarios prospectifs, à même d'anticiper sur l'urbanisation des années et des décennies futures, se doivent d'intégrer les préoccupations actuelles et à venir notamment du point de vue du changement climatique. Ces phénomènes doivent faire prendre conscience à l'ensemble de la population des enjeux auxquels nous sommes tous confrontés. Comprendre le fonctionnement du littoral est ainsi une clé pour que de telles questions, posées aujourd'hui sur certains territoires, ne soient pas éludées du fait d'une impression de permanence de notre environnement. L'anticipation pour la protection des populations littorales est la seule réponse adaptée aux défis futurs.

5 - Glossaire technique

Accrétion (ou engraissement ou accumulation) : Progression de la ligne de rivage par accumulation de sédiments.

Avant-côte : Espace ou domaine côtier sous le niveau des plus basses mers, proche du rivage, concerné par des échanges avec la côte.

Arrière-côte : Espace terrestre du rivage situé au-dessus du niveau des plus hautes mers.

Budget sédimentaire (ou bilan sédimentaire) : Bilan des apports et des pertes en sédiments sur une zone.

Caoudeyre : Excavation circulaire laissant apparaître le sable nu au milieu des surfaces végétalisées du cordon dunaire. Une caoudeyre peut être frontale, de plateau ou de deuxième ligne.

Cellule sédimentaire (ou unité sédimentaire) : Cellule du littoral indépendante du point de vue des transits sédimentaires (cf. 3.3.3.a.)

Climat de houle (ou climatologie de houle) : Caractéristiques des houles (hauteur, période, direction, etc.) en un point.

Corrélogramme : Corrélation entre deux variables dans le temps.

Dérive littorale : Flux de sédiments sensiblement parallèle au rivage, en proche côtier, résultant de différentes causes : vagues, courants, vent.

Digues côtières : ouvrages construits par l'homme, généralement longitudinaux, dont la vocation principale est de faire obstacle à l'écoulement et de limiter les entrées d'eau sur la zone protégée. Ils possèdent deux talus visibles (côté terre et côté mer) éventuellement confortés. Ces ouvrages ont pour fonction principale la protection contre la submersion et permettent de protéger des enjeux. Elles peuvent être situées sur le trait de côte ou en *arrière-côte* en tant que protection de seconde défense.

Dune (ou cordon dunaire) : Formation sableuse d'origine éolienne, généralement parallèle à la côte.

Érosion (ou démaigrissement) : Perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement de l'estran ou de la plage.

Estran : Espace compris entre le niveau des plus hautes et des plus basses mers connues ou zone de balancement des marées.

États de mer : Agitation locale de la mer due à la superposition de la mer du vent et de la houle.

Falaise : Escarpement vertical ou sub-vertical.

Flèche littorale : Forme constituée par l'accumulation de matériaux meubles (sables ou galets) entre un point d'ancrage à une extrémité et une pointe libre à l'autre extrémité s'avancant en mer.

Houle : Oscillation régulière de la surface de la mer, observée en un point éloigné du champ de vent qui l'a engendrée, dont la période se situe autour de dix secondes.

Jet de rive : Masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut d'un estran par l'action de déferlement des vagues (En anglais : swash).

Mer du vent : Système de vagues observé en un point situé dans le champ de vent qui les a générées. La mer du vent présente un aspect chaotique.

Morphodynamique : Discipline consacrée à l'étude des formes littorales et à leur évolution sous l'action de facteurs hydrodynamiques et éoliens.

Niveau d'eau : Niveau intégrant les effets de la marée et de la surcote météorologique.

Niveau marin à la côte : Niveau marin à prendre en compte pour l'étude de l'aléa submersion marine. Il prend en compte l'ensemble des phénomènes influant sur le niveau et est déterminé à partir du niveau d'eau et des vagues. Il est appelé aussi niveau marin total.

Profil de plage : Topographie de la plage représentée dans un plan vertical orienté de la terre vers la mer.

Ouvrage de protection côtier : Structure côtière construite et dimensionnée ayant pour objectif d'atténuer les impacts de phénomènes naturels sur un secteur géographique particulier appelé zone protégée. Il répond à une vocation initiale de fixation du trait de côte, de lutte contre l'érosion, de soutènement des terres, de réduction des franchissements, de dissipation de l'énergie de la houle ou d'obstacle à l'écoulement.

Platier : Étendue rocheuse à l'affleurement sur l'estran.

Polder : Zone basse conquise sur la mer par endiguement.

Run-up : Altitude maximale atteinte par le jet de rive.

Seiche : Oscillation libre ayant le caractère d'une onde stationnaire de la surface d'un plan d'eau fermé ou semi-fermé (lac, bassin, baie), de période supérieure à la minute.

Set-up (ou wave set-up) : cf. Surcote liée aux vagues.

Structure côtière de protection : Entité naturelle ou anthropisée ayant un impact sur le littoral en modifiant localement les phénomènes hydrauliques ou sédimentaires et jouant un rôle de protection face aux aléas littoraux.

Submersion : Action de submerger/d'inonder. Par convention, on emploiera de manière indifférenciée les termes inondation et submersion.

Subsidence : Abaissement du niveau de la surface de la croûte terrestre par mouvement tectonique.

Surcote : Différence positive entre le niveau marégraphique observé/mesuré et le niveau de marée prédite.

Surcote liée aux vagues : Surcote locale provoquée par la dissipation d'énergie liée au déferlement des vagues.

Surcote météorologique : Surcote provoquée par le passage d'une dépression et prenant en compte les effets du vent, de la pression (surcote barométrique inverse) et des effets dynamiques liés au déplacement de l'onde de surcote.

Surrection : Relèvement du niveau de la surface de la croûte terrestre par mouvement tectonique.

Système de protection/de défense : Système globalement cohérent du point de vue hydraulique pour la protection effective des populations situées dans la zone protégée. Il peut être constitué de plusieurs structures ou éléments de protection, pouvant être de différents types : un système de digues (c'est-à-dire des digues de premier et de second rang), des structures naturelles (cordons dunaires ou cordons de galets), des remblais, dont l'objectif premier ne serait pas la protection contre la submersion. Il peut être complété par d'autres protections comme les dispositifs de drainage, de stockage et d'évacuation des eaux et les ouvrages « maritimes » contribuant à leur maintien (type brise-lames, épis, etc.) éventuellement associés.

Trait de côte : défini, en matière de cartographie marine et terrestre, comme la ligne portée sur la carte séparant la terre et la mer. L'évolution de la position du trait de côte permet de rendre compte de la dynamique côtière. Différentes définitions, ou plutôt différents indicateurs de sa position, co-existent et peuvent être adoptés pour tenir compte de la diversité des morphologies du littoral.

6 - Sigles

ANEMOC : Atlas Numérique des Etats de Mer Océaniques et Côtiers
BD ALTI : Base de Données Altimétrique de l'IGN
BDHI : Base de Données des événements Historiques d'Inondation
BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière
CANDHIS : Centre d'Archivage National des Données de Houles In-Situ
CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement
CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
CERTU : Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CM : Cote Marine
DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer
DGALN : Direction Générale, de l'Aménagement, du Logement et de la Nature
DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques
dGPS : GPS différentiel (en anglais *Differential Global Positioning System*)
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (en français, CEPMMT – Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme)
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IGN : Institut Géographique National
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ONF : Office National des Forêts
MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
METL : Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement
NCEP : National Centers for Environmental Prediction
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
MNT : Modèle Numérique de Terrain
PPR : Plan de Prévention des Risques
PPRL : Plan de Prévention des Risques Littoraux
RGE : Référentiel Grande Échelle
SCOH : Service de Contrôle des Ouvrages Hydrauliques
SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIOUH : Système d'Information des Ouvrages Hydrauliques
TU : Temps Universel

7 - Principales références bibliographiques

Bailard J. (1981). An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. J. Geophys. Res. 86 (C11), 10938–10954.

Bijker E. (1968). Littoral drift as function of waves and current. 11th Coastal Eng. Conf. Proc. ASCE, London, UK, pp. 415–435.

Boak E.H. and Turner I.L. (2005). Shoreline Definition and Detection : A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688–703. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Camenen B. and Larroudé P. (2003). Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment. *Coastal Engineering* 2003, vol. 48, no2, pp. 111-132.

CETMEF -Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2002). Reconnaissance de la limite terrestre du domaine maritime – Intérêts et potentialité de critères morfo-sédimentaires et botaniques. Rapport Laboratoire de Géomorphologie et Environnement Littoral de Univ. Paris I, Paris IV, Paris VII, EPHE et du Service de botanique de l'Univ. Rennes I.

CETMEF -Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2011). Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers - Notice méthodologique. ISBN : 978-2-11-128283-4 ; Référence CETMEF : C 11-01, 62 p.

Costa S., Delahaye D. (2005) « Beaches At Risk » Rapport final du programme Européen INTERREG 3a. Conseil Régional de Haute-Normandie. 187 p.

- Dibajnia M. and Watanabe A. (1992). Sheet flow under nonlinear waves and currents. *Coast. Eng.*, 2015– 2029.
- DHI – Géos/AEL. (2007). Étude de l'aléa submersion marine sur le site de la grande plage de Gâvres, Novembre 2007, DDE du Morbihan.
- DHI – Géos/AEL. (2009). Étude de détermination de l'aléa de submersion marine intégrant es conséquences du changement climatique sur le littoral de la région Nord-Pas-de-Calais, DREAL Nord-Pas de Calais
- DHI – Géos/AEL. (2011). Atlas des risques littoraux du Morbihan, Recensement et conséquences des coups de vents et des tempêtes majeures, septembre 2011, DDTM du Morbihan.
- IFEN – Institut Français de l'Environnement - (2007). Analyse statistique et cartographie de l'érosion marine. Les dossiers. Numéro 6, Octobre 2007. ISSN : 1776-8411.
- Kamphuis J. W. (1991). A longshore sediment transport rate, *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 117(6), pp. 624-641.
- List J. H. & Ashton A. D. (2007). A circulation modeling approach for evaluating the conditions for shoreline instabilities, in *Proceedings of the Sixth International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes*, pp. 327–340, Am. Soc. Civ. Eng., Reston, Va.
- MATE, METL -Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement- (1999). Plan de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de Terrain. Guide méthodologique. La documentation française, Paris, 71 p.
- MEEDDM -Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer- (2010). La gestion du trait de côte, Ed. Quae, 290 p.
- MEDDE -Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie- (2014). Plan de prévention des risques littoraux. Guide méthodologique. DGPR, mai 2014, 169 p. http://catalogue.prim.net/238_guide-methodologique-plan-de-prevention-des-risques-littoraux.html
- MEDDTL (2011) Plan National d'Adaptation au Changement Climatique
- MEDDTL (2012) Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens. 20 p.
- Mignot C. (1988), Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion sédimentaire du littoral, ER PM – N°88.01, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.
- ONERC (2010). Synthèse - Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. 6p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf
- ONERC (2012) Le climat de la France au XXIe siècle Volume 3, Évolution du niveau de la mer
- Pilkey O.H. & Cooper J.A.G. (2002). Longshore Transport Volumes: A Critical View, *Journal of Coastal Research*, SI 36, 572-580, (ICS 2002 Proceedings), ISSN 0749-0208.
- Ribberink J. (1998). Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows. *Coast. Eng.* 34, 52– 82.
- Sabatier F. (2001) Thèse en Géoscience de l'Environnement, Université Aix-Marseille III. *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône* . Directeur Mireille Provansal. Financement Région PACA et Compagnie des Salins du Midi.
- SHOM, CETMEF -Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2008). Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer – Manche et Atlantique. Référence CETMEF : C 08-05 ; ISBN : 978-2-11-098357-2.

SHOM, CETMEF -Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2012). Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). ISBN 978-2-11-128331-2.

SUANEZ S., CARIOLET J.-M., CANCOUËT R., ARDHUIN F., DELACOURT F. (2012) - Dune recovery after storm erosion on a high-energy beach: Vougot beach, Brittany (France), *Geomorphology*, vol. 139-140, p. 16-33. doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.014

USACE (1984). Shore Protection Manual (3rd Ed.), U.S. Gov. Print. Office.

Van Rijn L. (1989). Handbook Sediment Transport by Currents and Waves, Vol. Report H461. Delft Hydraulics.

© 2014 - Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, créé au 1er janvier 2014 par la fusion des 8 CETE, du Certu, du Cetmef et du Sétra.

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Égalité des territoires et du Logement. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durable, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Impression : Les Ateliers DEMAILLE

Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema/Direction technique Eau, mer et fleuves

Achevé d'imprimer : Octobre 2015

Dépôt légal : Octobre 2015

ISBN : 978-2-37180-099-1

ISSN : 2417-9701

Prix : 50 euros

Illustration couverture ou crédits photos : Berck-sur-Mer - 2010 @Stéphane Costa (Université de Caen)

Editions du Cerema

Cité des mobilités,
25 avenue François Mitterrand
CS 92803
69674 Bron Cedex

Direction technique Eau, mer et fleuves

134 rue de Beauvais
CS 60039
60280 Margny-Lès-Compiègne

Bureau de vente de la Direction technique Eau, mer et fleuves

Cerema/Direction technique eau, mer et Fleuves

151 quai du Rancy

BP 30023

94381 Bonneuil-sur-Marne cedex

bventes.dtecmf@cerema.fr

www.cerema.fr

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

Cahier technique

Ce cahier technique traite de l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral. Cette analyse est indispensable pour toute étude d'aménagement côtier et d'aléas littoraux (recul du trait de côte, submersion marine, migration dunaire), notamment comme première phase avant la caractérisation et la cartographie des aléas.

Cette phase tente de comprendre les évolutions physiques du littoral, à différentes échelles de temps, sous l'effet de multiples facteurs, climatiques et météorologiques, mais aussi anthropiques. Cette analyse du fonctionnement du littoral est réalisée indépendamment des aléas qui affectent le territoire considéré. Elle démarre par une analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire, comprenant notamment une analyse géomorphologique du territoire, une analyse des conditions météorologiques et hydro-dynamiques et une analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire. Elle se poursuit par une analyse historique qui étudie au cours du temps l'évolution de la configuration de la frange littorale et des implantations humaines ainsi que les conséquences des tempêtes en termes de submersions marines ou d'évolution de la morphologie de la frange littorale. Enfin, une synthèse permet de définir précisément le périmètre d'étude et les aléas à considérer et, pour chaque aléa à caractériser, les principaux phénomènes à leur origine, permettant de définir les méthodes de caractérisation et les hypothèses adaptées.

Aménagement et développement des territoires, égalité des territoires - Villes et stratégies urbaines - Transition énergétique et changement climatique - Gestion des ressources naturelles et respect de l'environnement - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Gestion, optimisation, modernisation et conception des infrastructures - Habitat et bâtiment



Prix 50€
ISSN : 2417-9701
ISBN : 978-2-37180-099-1

