

1- Le littoral

1.2. Fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

Fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

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.

Ce travail permet de comprendre les évolutions physiques du littoral, à différentes échelles de temps, sous l'effet de multiples facteurs, climatiques et météorologiques, mais aussi anthropiques. Il 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**. Ce travail ne traite pas d'une analyse historique qui devrait étudier 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.

1. PRÉREQUIS TECHNIQUES CONCERNANT LA CONNAISSANCE DES PHÉNOMÈNES ET ALÉAS LITTORAUX

1.1 - Les formes littorales

- Les côtes basses meubles
- Les côtes à falaises
- Baies, estuaires et deltas

1.2 - Les ouvrages de protection

1.3 - Phénomènes météo-marins

- Le niveau marin
 - Le niveau moyen de la mer
 - La marée théorique
 - Les surcotes / décotes
- Les effets hydrodynamiques et météorologiques locaux
 - Le déferlement des vagues
 - Les seiches
- Les tsunamis

- Le changement climatique

1.4 - Aléas littoraux

- Le recul du trait de côte
- La migration dunaire
- La submersion marine

2 - MÉTHODE D'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDRO-SÉDIMENTAIRE DU LITTORAL

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

2.2 - Principes généraux du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

2.3 - Fonctionnement hydro-morphosédimentaire du secteur d'étude

- 2.3.1 - Analyse du cadre géomorphologique
 - 2.3.1.a - Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques
 - 2.3.1.b - Les caractéristiques sédimentologiques des plages
 - 2.3.1.c - Les caractéristiques topo-bathymétriques
 - 2.3.1.d - Caractéristiques morpho-sédimentaires et bathymétriques des fonds et de l'estran
- 2.3.2 - Analyse des conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques
 - 2.3.2.a - Contexte climatique et météorologique
 - 2.3.2.b - Les conditions hydrodynamiques
- 2.3.3 - Fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral
 - 2.3.3.a - La cellule hydro-sédimentaire
 - 2.3.3.b - Le trait de côte : modalités de définition et limites
 - 2.3.3.c - Le profil de plage : modalités de définition et limites
 - 2.3.3.d - Le système dune-plage : un transport sédimentaire lié au vent
 - 2.3.3.e - Les transports sédimentaires sous l'action des houles et des marées
 - 2.3.3.f - L'analyse du recul des falaises : actions continentales et marines
- 2.3.4 - Les ouvrages de protection contre les aléas littoraux
- 2.3.5 - Analyse du fonctionnement hydraulique du site

2.4 - Approche historique

- 2.4.1 - Évolution du trait de côte
 - 2.4.1.a - L'analyse diachronique de la dynamique côtière
 - 2.4.1.b - L'estimation des vitesses et des rythmes d'évolution
- 2.4.2 - L'inventaire des submersions marines historiques
- 2.4.3 - L'évolution de l'occupation humaine : modes d'urbanisation et occupation du sol

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

- 3.1. - Le recul des côtes rocheuses et à falaises
- 3.2 - Le recul des côtes basses meubles et la migration dunaire
- 3.3 - La submersion marine

4 – ANNEXES

- 4.1. La houle régulière
- 4.2 - La déformation de la houle
- 4.3 - La houle irrégulière
- 4.4. Les marées
- 4.5. Le transport sédimentaire
- 4.6. Les profils de plages

1. PRÉREQUIS TECHNIQUES CONCERNANT LA CONNAISSANCE DES PHÉNOMÈNES ET ALÉAS LITTORAUX

1.1 - 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%). La diversité morphologique est accentuée par de nombreuses indentations (baies, golfes, rias, abers, estuaires, deltas...).

Les côtes basses meubles : plages et dunes	Les côtes à falaises	Baies, estuaires et deltas
<ul style="list-style-type: none"> • Plages dissipatives: la pente de la plage est peu importante et les vagues déferlent plus fortement, entraînant beaucoup de sédiments. • Plages réfléchives : la pente est plus forte. • Autres plages : de fond de baie, plages ouvertes, flèches littorales. • Dune littorale : construite et façonnée par le vent 	<p>Ce sont des escarpements souvent rocheux créés par l'érosion le long d'une côte.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falaises vives : encoche à la base, montrant son contact avec la mer et l'action érosive de celle-ci. • Falaises stabilisées et mortes : situées en arrière du littoral et n'étant plus en contact avec la mer, • Falaises situées en arrière littoral mais en érosion du fait des actions terrestres (infiltration, gel...). <p>La falaise évolue par 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.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Baies : échancrures du littoral dans lesquelles se jettent généralement un ou plusieurs fleuves. • Estuaires : pénétration d'eaux salées à l'aval d'un système fluvial, au gré des marées. Zone d'inondations d'origine continentale et de submersions marines. La limite amont de l'estuaire est 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 un rôle dans la prévention des submersions marines. • Deltas : accumulation d'alluvions à l'embouchure des fleuves à hydrodynamique de faible énergie (houle modérée et faible marnage). C'est un espace dynamique, mobile et fréquemment submergé par des crues continentales et par des intrusions marines.

1.2 - Les ouvrages de protection

Ce sont des structures 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. 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).

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

- **Ouvrages de soutènement** : Ils comprennent les murs (murs poids ou en béton armé) et les soutènements plans (rideaux de palplanches, etc.). Ils servent au maintien direct du trait de côte en s'opposant à la poussée des terres et luttent contre l'érosion.
- **Digues côtières** : Ces ouvrages longitudinaux font obstacle à l'écoulement et protègent contre la submersion. Ils peuvent être situés sur le trait de côte ou en arrière-côte.
- **Perrés (non associés à des digues)** : Ils sont constitués d'un revêtement (maçonnerie, béton, enrochements) recouvrant un talus autostable. Ils assurent un maintien du trait de côte immédiat et, dans certains cas, la protection des terres contre la submersion marine.
- **Brise-lames** : Les brise-lames sont des dispositifs orientés parallèlement au trait de côte (ouvrages longitudinaux), mais non rattachés à celui-ci. Ils diminuent 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, formant parfois un tombolo artificiel. Les matériaux de construction varient, allant d'une structure « à talus » avec carapace en enrochements jusqu'aux caissons bétonnés posés directement sur le fond.
- **Épis** : Les épis sont des dispositifs placés sur l'estran, de manière transversale par rapport au trait de côte. Ils maintiennent le trait de côte et jouent un rôle de barrière plus ou moins perméable, capable de piéger une partie des sédiments en transit. L'accumulation peut permettre de lutter contre l'abaissement topographique de la plage.
- **Méthodes de protection « douces »** : Ces méthodes ne s'opposent pas nécessairement aux facteurs de forçage, mais composent avec eux. Elles permettent de lutter contre l'érosion des plages et les submersions marines. Parmi elles, le rechargement de plage et le confortement dunaire sont les plus fréquents.
- **Rechargement de plage** : Cette technique consiste à apporter des sédiments pour remonter le niveau topographique de la plage et protéger l'arrière-côte.
- **Confortement dunaire** : Il permet d'engraisser ou de stabiliser un cordon dunaire, au moyen de revégétalisation, reprofilage topographique et implantation de ganivelles pour piéger le sable éolien.
- **Confortement de falaise** : Différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour lutter contre l'érosion de falaise, telles que le drainage de falaise, les grillages, la projection de matériaux type béton et la protection du pied de falaise par des enrochements.

1.3 - Phénomènes météo-marins

1. Le niveau marin

Le niveau moyen de la mer : c'est la moyenne du niveau de la mer selon un pas de temps court devant le phénomène de marée (une heure).

À moyen terme, ce niveau est considéré constant en un lieu. Il suit des variations séculaires actualisé à cause du changement climatique.

La marée théorique : c'est 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).

Les surcotes / décotes : La surcote ou décote instantanée est la différence à un instant donné entre le niveau de la mer observé et le niveau de marée prédit. Ces différences sont d'origine météorologique (dépressions, anticyclones).

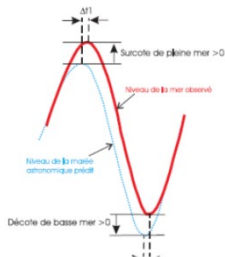


Illustration 2 : Surcote de PM (Source : SHOM)

2. Les effets hydrodynamiques et météorologiques locaux

Le déferlement des vagues : La hauteur de la vague en haute mer dépend de sa hauteur initiale, du rapport entre la hauteur et la longueur d'onde, ainsi que de la vitesse du vent qui l'a engendrée. Lorsqu'une vague arrive dans des eaux peu profondes, elle peut déferler de différentes manières.

Sur une plage à pente douce, le déferlement commence progressivement (processus dit "spilling" ou "déversement"), dissipant l'énergie sur une grande distance avant d'atteindre le rivage.

Sur une plage à pente raide, le déferlement est soudain (phénomène de "surf beat"), libérant l'énergie sur une courte distance juste avant d'atteindre le rivage.

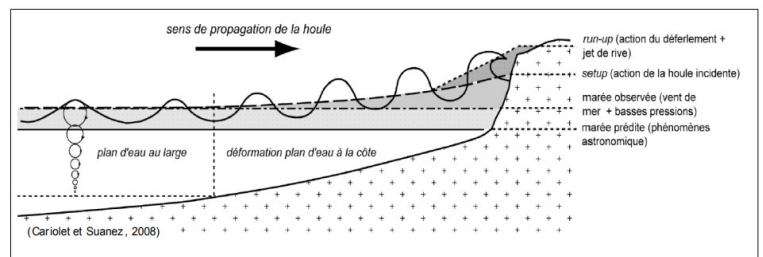


Illustration 3 : Paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes

Les seiches : Ce sont des oscillations stationnaires de grande période temporelle (30 s à quelques heures) se produisant dans les baies ou les ports. Elles sont liées à un phénomène de résonance entretenu par des ondes longues, des variations de pression atmosphérique ou des trains de vagues.

3. Les tsunamis

C'est un envahissement exceptionnel du rivage par la mer, sous la forme d'une ou plusieurs vagues de taille très importante. Un tsunami 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 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

4. Le changement climatique

Il provoque une accélération de l'élévation du niveau moyen de la mer liée à la dilatation et à l'augmentation des masses d'eau (fonte des glaciers, calottes glacières...). Cette montée de la mer refaçonne les côtes et modifie les profils de plage et le trait de côte ou les modes de submersions.

<p>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.</p>	
---	--

1.4 – Les aléas littoraux

- **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. Il peut être la conséquence d'une perte de matériaux due à l'érosion marine, qui peut être naturelle (sous l'effet des forces marines) ou induite par l'homme (sur-fréquentation, extraction, urbanisation proche du littoral, etc.). Les côtes basses et meubles ainsi que les côtes à falaises peuvent reculer, mais leur mécanisme de recul diffère. Les **côtes basses meubles** sont caractérisées par une **mobilité permanente**, tandis que les côtes à falaises ne peuvent que reculer. Le recul du trait de côte est souvent plus complexe à appréhender sur les côtes à falaises en raison de la combinaison des actions continentales et des actions directes de la mer.



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

- **La migration dunaire** : Il s'agit du mouvement des dunes de sable vers l'intérieur des terres. Ces dunes mobiles, non stabilisées par la végétation, peuvent reculer et menacer des habitations, des voies de communication ou des cultures. Les phénomènes de migration dunaire se produisent le long des 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. La déstabilisation du couvert végétal, qu'elle soit naturelle ou anthropique, peut également entraîner la formation de dunes paraboliques. Ces migrations sont plus lentes que d'autres aléas littoraux, mais leurs effets spatiaux peuvent être significatifs.



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

- **La submersion marine** : ce 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'ouest déclenchant, 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
- 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.



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)

2. MÉTHODE D'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDRO-SÉDIMENTAIRE DU LITTORAL

L'analyse des phénomènes naturels et de leurs conséquences physiques possibles, c'est-à-dire la caractérisation des aléas littoraux, se déroule selon deux phases :

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

2.1.1. Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

- Cette phase préalable aux analyses des différents aléas vise à comprendre le fonctionnement de la zone étudiée.
- Elle décrit les phénomènes qui affectent le littoral et confirme le périmètre d'étude à retenir.
- L'analyse peut être effectuée à différentes échelles, en fonction des informations disponibles.
- Elle s'appuie sur la bibliographie existante, les données disponibles et les observations de terrain.

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 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.

2.1.2. Caractérisation et cartographie des aléas :

Cette 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

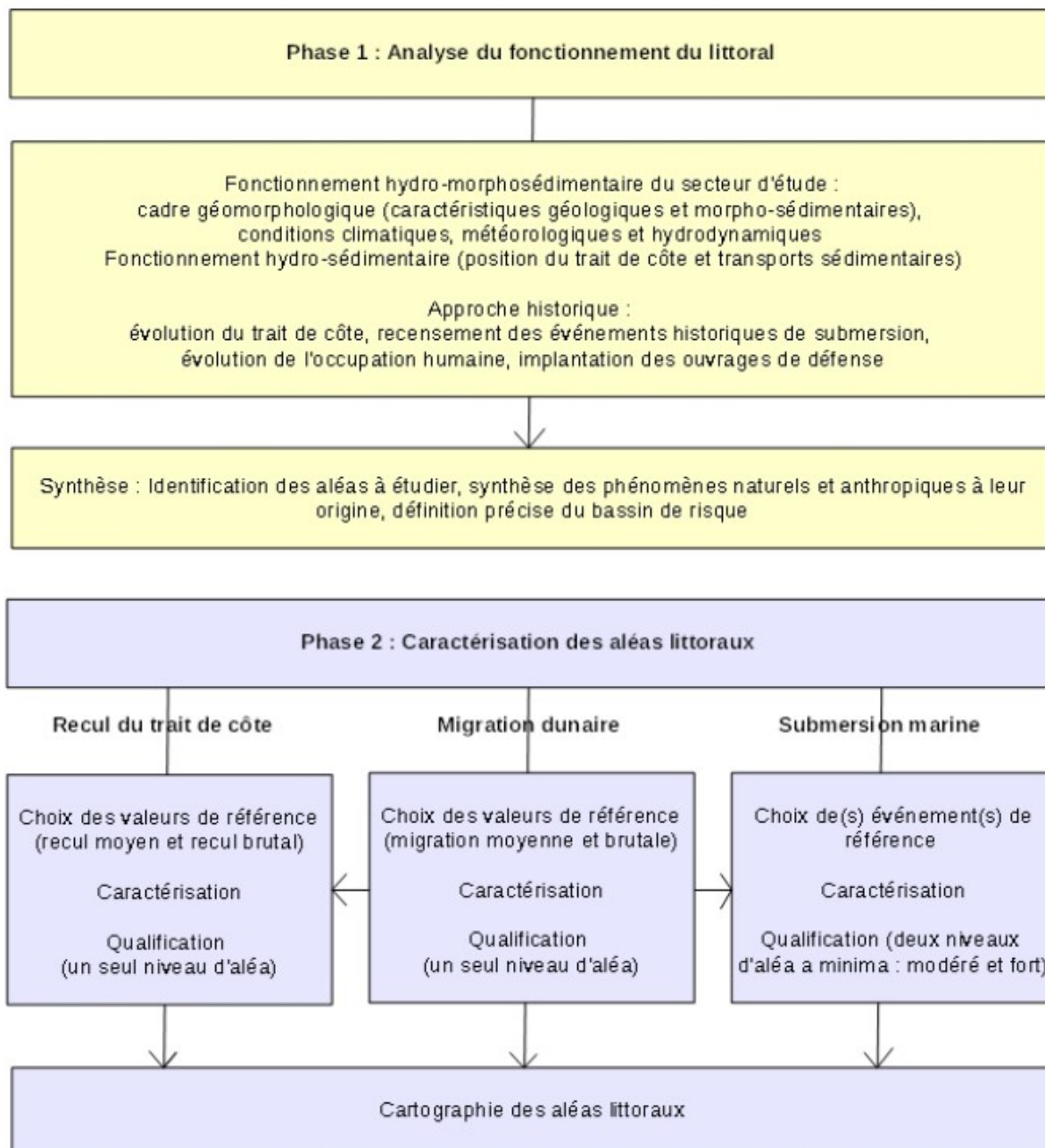


Illustration 10 : Démarche de l'étude des aléas littoraux

- 3.2 - Principes généraux du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral

2.2 - 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). Les influences qui s'y manifestent sont de types continentales (caractéristiques géologiques et géomorphologiques), marines (vagues, marées, courants), atmosphériques (vent, pression, température, etc.) et anthropiques (aménagements).

Certains principes sont fondamentaux pour l'analyse du fonctionnement général des littoraux.

1. Principe de non-linearité des évolutions :

- La dynamique des rivages résulte souvent de facteurs et processus qui se succèdent et se combinent.
- Le fonctionnement des littoraux est non linéaire dans le temps et l'espace.
- L'analyse doit considérer à la fois le court terme et le temps long (échelle historique).

2. Principe d'emboîtement des échelles d'espace et de temps :

- Il faut replacer le site d'étude dans son bassin de risque et au sein de la cellule hydro-sédimentaire.
- Considérer les phénomènes naturels sans tenir compte des limites administratives.
- Analyser la dynamique littorale sur le temps long pour compléter les éléments de connaissance.

3. Principe d'emboîtement des échelles d'espace et de temps :

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), 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.

2.3 - Fonctionnement hydro-morphosédimentaire du secteur d'étude

2.3.1 - 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 :

1. Côtes de relief, rocheuses ou à falaise (ou côtes d'érosion) :

- Elles sont permises par un contact direct à la mer.
- Leur érosion est continue mais leur recul se fait par à-coups.
- Ces côtes reculent progressivement en raison de l'action combinée de la mer et des processus continentaux.
- La résistance mécanique des matériaux rocheux influence leur vitesse de recul.

2. Côtes d'accumulation, constituées de matériaux meubles :

- Principalement d'origine minérale, ces sédiments (vases aux blocs) proviennent de la désagrégation des roches.
- Ils se répartissent le long de reliefs à faible pente.
- Ces formes, mobiles, subissent alternativement des phases d'accumulation et de démaigrissement.

- Exemples : plages de sables ou de galets, estuaires, lagunes, deltas, marais maritimes, mangroves, systèmes coralliens, etc.

2.3.1.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. Il est également important de prendre en compte les mouvements verticaux terrestres (surrection et subsidence) ainsi que l'évolution à long terme du niveau marin pour la caractérisation de l'aléa de submersion marine.

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

- 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. En cas avéré, les fractures en grand (failles) ainsi que les phénomènes de plissement (folds) modifient le niveau initial du terrain et donc l'écoulement superficiel et souterrain de l'eau, générant ainsi des risques potentiels d'inondation ou à l'affouillement des fondations.

Les analyses géomorphologiques 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 décohesion, 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.

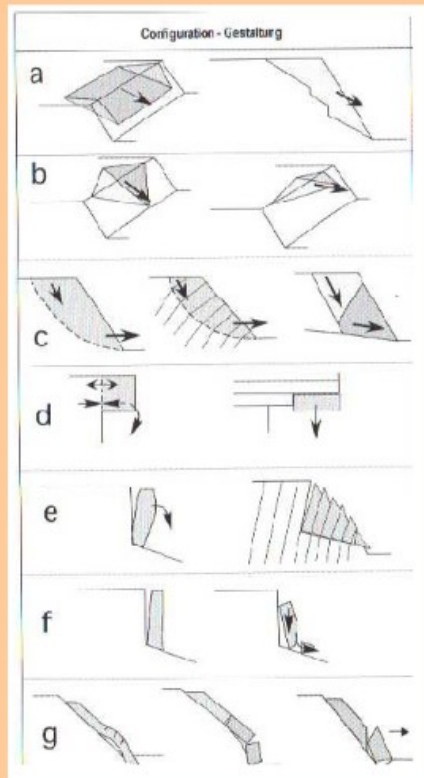


Illustration 11 : Représentation schématique des différents mécanismes générant des instabilités de versants côtiers et de falaises.

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.

2.3.1.b - Les caractéristiques sédimentologiques des plages

Il est utile de définir les caractéristiques sédimentologiques des plages et des cordons de sable, galets ou autres matériaux locaux. La nature et la répartition de ces éléments en présence dépendent de leur disponibilité dans l'environnement géologique local ou régional, de l'héritage géologique ancien et des forces combinées dynamiques du milieu actuel (vent, courants marins/côtiers). Leurs caractéristiques granulométriques (taille, forme) sont importantes pour le fonctionnement hydraulique du système plage/dune et pour la gestion du trait de côte en termes d'érosion ou d'engraissement par apports sédimentaires externes ou internes au système plage/dune.

Les études sur les transports sédimentaires permettent d'établir les bilans et l'intensité des déplacements (cf. la figure schématisée illustrant les stocks et transferts). Ces travaux aboutissent à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire en vue d'une gestion durable des ressources littorales (cf. la cellule hydro-sédimentaire décrite en 3.3.2) et donc à une meilleure protection contre l'érosion côtière.

2.3.1.c - Les caractéristiques topo-bathymétriques

La caractérisation de la topographie et de la bathymétrie d'une zone d'étude est fondamentale. Les données utilisées doivent être précises et actualisées autant que possible. L'ensemble des données bathymétriques et topographiques, même anciennes, disponibles doit être recensé et analysé. Parfois, l'acquisition de données topo-bathymétriques fines

supplémentaires est nécessaire (cf. Encart 3). 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 :

- En l'absence de levés topographiques à grande échelle disponibles sur la zone d'étude, on recourt le plus souvent aux données de l'Institut Géographique National (IGN), commercialisées sous forme de cartes, ainsi qu'aux bases de données "BD ALTI®" et "BD TOPOR". Ces dernières permettent la réalisation de modèles numériques de terrain (MNT) avec un pas de maille pouvant atteindre 25 m. Cependant, leur précision altimétrique est de l'ordre du mètre sur les points cotés et de 2 à 3 m sur les courbes de niveau. Ces données sont utiles pour l'analyse du fonctionnement du littoral, mais insuffisantes pour l'analyse des aléas.
- Pour caractériser les aléas, il est essentiel d'avoir des données topographiques plus fines. Les données Lidar (laser aéroporté) sont recommandées lorsque disponibles, avec une précision altimétrique inférieure à 20 cm. Si les données Lidar ne sont pas disponibles, des levés complémentaires (par exemple, à l'aide de dGPS) sont nécessaires pour obtenir des MNT précis correspondant aux niveaux d'aléas du Plan de Prévention des Risques (PPR). Lors de ces levés, il convient de prêter attention aux principaux obstacles à l'écoulement, aux ouvrages de protection, aux structures naturelles et aux zones urbanisées.

Les données bathymétriques :

Des données bathymétriques sont nécessaires pour l'analyse des phénomènes marins. Dans le cadre des études préalables aux PPR, 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 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 PPR. 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

2.3.1.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. Par exemple, les plages, les cordons naturels ou les falaises peuvent être en position d'abri ou au contraire battus par les vagues, ce qui influe 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 peut réduire l'énergie des vagues à la côte, limitant ainsi les risques d'érosion et de franchissements par paquets de mer. Cependant, des phénomènes de diffraction ou de réfraction peuvent concentrer l'énergie des houles en certains points du rivage.

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, Ortholittorale 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 (BDDBS), 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.

“Type de données géomorphologiques, BD Charm 1/25 000 ou InfoTerre du BRGM, RGE de l'IGN ; sites géologiques du réseau Natura2000, Atlas littoral du SHOM, Observatoire Global du Saint-Laurent (OGSL), travaux universitaires et autres données bibliographiques récoltées.”

2.3.2. 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.

2.3.2.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 climatique.

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'ajouteront à la surcote barométrique liée à la pression atmosphérique.

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 à travers d'études régionales, sont à apporter. Sur ce point, il sera fait référence aux travaux du GIEC et de l'ONERC."

2.3.2.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 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 recensés et collectés (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
 - 3.3.3.a - La cellule hydro-sédimentaire

2.3.3. 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

2.3.3.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 doit 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.

Les limites de la cellule hydro-sédimentaire

La cellule sédimentaire, également appelée unité ou compartiment hydro-sédimentaire, est délimitée par des frontières plus ou moins perméables aux échanges sédimentaires. Ces frontières peuvent être fixes (comme les caps rocheux, les jetées ou les digues) ou mobiles (comme les dunes ou les falaises meubles). Elles jouent un rôle crucial dans la dynamique des sédiments le long du littoral.

Types de limites :

1. **Limites latérales** : Elles correspondent aux côtés de la cellule et peuvent être des points d'arrêt plus ou moins perméables au transit sédimentaire.
2. **Limites transversales** : Ce sont des points d'arrêt entre le large et la côte. Leur niveau de perméabilité varie, et il est essentiel de connaître leur impact sur les échanges sédimentaires.

Modes de fonctionnement :

- **Cellules dites ouvertes** : Les limites correspondent au point d'inversion de la dérive littorale, permettant des échanges importants avec les cellules voisines.
- **Cellules dites fermées** : Les échanges avec l'extérieur sont très limités.

Bilan sédimentaire :

Il est utile d'établir le bilan des entrées et des sorties sédimentaires pour comprendre le fonctionnement de la cellule. Cependant, cela peut être délicat à apprécier.

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.

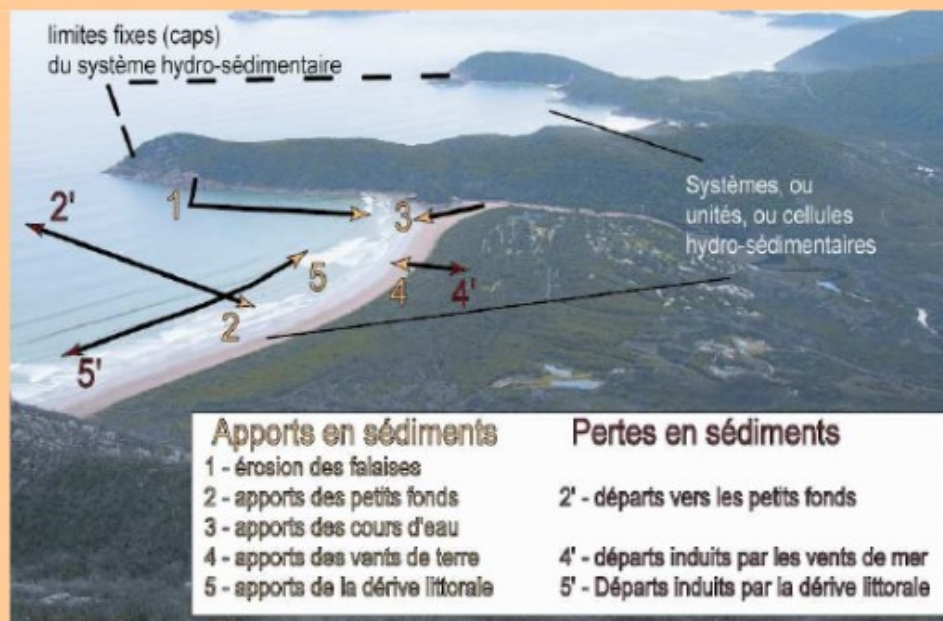


Illustration 13 : La cellule hydro-sédimentaire et son bilan sédimentaire (Source : S. Costa)

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.

2.3.3.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).

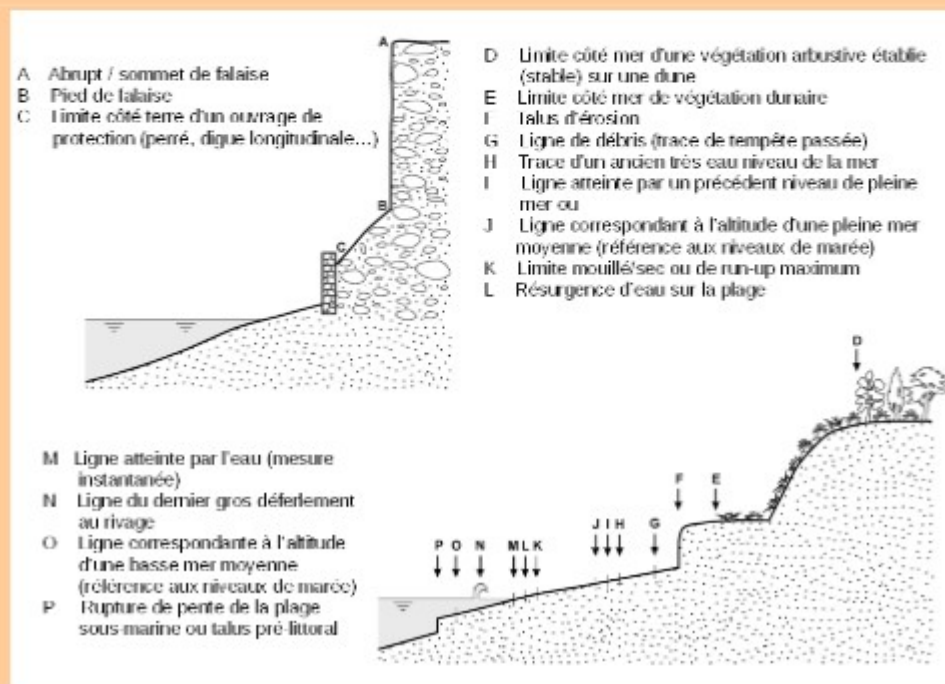


Illustration 15 : Représentation schématique d'indicateurs de position du trait de côte utilisés couramment (d'après Boak and Turner, 2005)

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.

2.3.3.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.

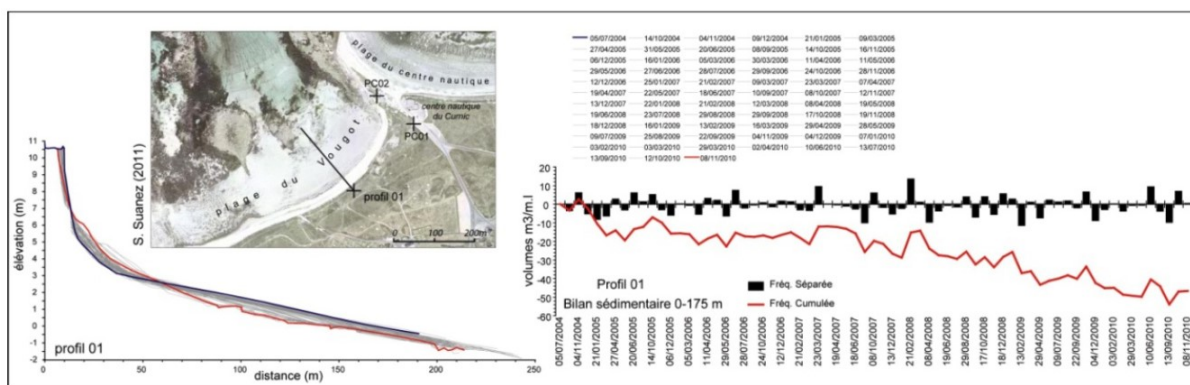


Illustration 17 : Enveloppe de profils de plage intertidale / dune et calcul du bilan sédimentaire entre 2004 et 2010 – Plage du Vougot, Guissény, Finistère – (Source : Suanez et al., 2012).

2.3.3.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 laisses de mer, la végétation...

2.3.3.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. À 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 lorsque l'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 n'est pas 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 départs 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 lits - fixes et mobiles - de la cellule hydro-sédimentaire), et des agents et processus qui les génèrent, est indispensable à la compréhension du fonctionnement d'une estuaire et donc de l'équilibre dynamique que représente le couple sédimentation/érosion.

En l'absence de données quantitatives, des observations de terrain permettent toutefois d'estimer le sens et les directions des transports par comparaison avec les hauteurs relatives des dépôts ou les niveaux d'érosion observés sur les berges ou au fond du chenal. Ces observations sont complétées par une analyse granulométrique permettant d'identifier la nature du matériel en suspension ou déposé sur le lit majeur lors des crues (granulats fins à moyens) ainsi que sa provenance (lits mineurs érodés). Les éléments grossiers (> 20 mm) sont généralement peu mobiles dans un estuaire fluvial.

La compréhension du fonctionnement s'appuie le plus possible sur la bibliographie disponible pour chaque zone étudiée afin d'intégrer au mieux les connaissances acquises sur ces milieux spécifiques. Ainsi certaines méthodes plus détaillées pourront être appliquées pour évaluer plus précisément certains aspects du transport sédimentaire.

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, courantomètres 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.

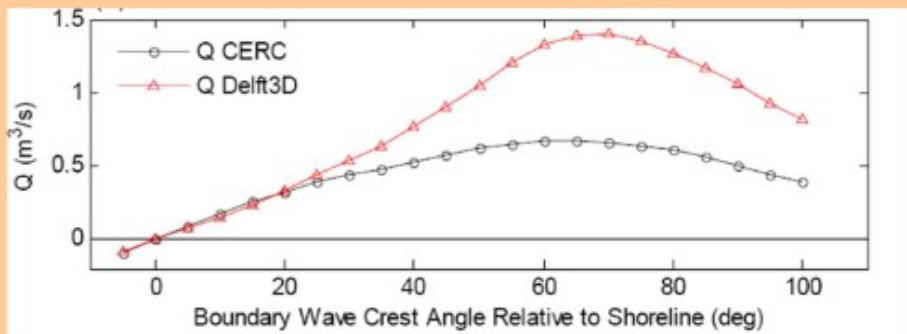


Illustration 18 : Flux de sédiments longitudinal en fonction de l'angle d'incidence des vagues au large par rapport à la côte sur une côte uniforme, cas d'une mer de vent (Source : List and Ashton, 2007).

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

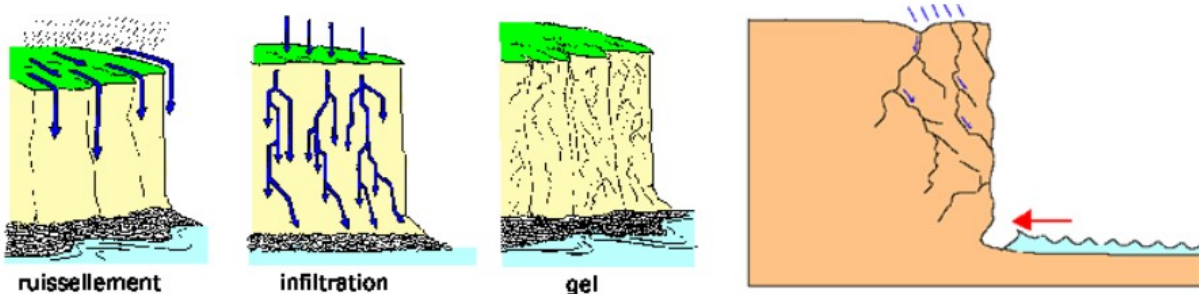


Illustration 19 : Principales actions continentales et marines à l'origine du recul des falaises et côtes rocheuses (d'après Paskoff, 1993)

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 futures.

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 surface 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 ruissellement...). 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.

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

2.3.4 - 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 ;
- leur 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'endigement...), 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 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.

2.3.5 - Analyse du fonctionnement hydraulique du site

La frange littorale a été modelée 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. 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.

3.1. 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).

3.2.- 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..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).