



Etat des connaissances sur les méthodologies d'évaluation de l'évolution des morphologies côtières

Rapport final

BRGM/RP-60107-FR

Juillet 2011

Etat des connaissances sur les méthodologies d'évaluation de l'évolution des morphologies côtières

Rapport final

BRGM/RP-60107-FR
Juillet 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets de
Service public du BRGM 2011

C. Augeard ; E. Tirard ; Y. Balouin

Vérificateur :

Y. DE LA TORRE

Approbateur :

M. AUDIBERT

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

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



Mots clés : littoral ; long terme ; méthodologie ; morphologie ; niveau marin.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Augeard, C. Tirard, E. et Balouin, Y., 2011. Etat des connaissances sur l'évolution des géomorphologies côtières. Rapport RP-60107-FR, 67 p.

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le volet « Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du Contrat de Projet Etat-Région 2007-2013 du Languedoc-Roussillon.

Ce rapport concerne la tâche 1 de l'action 5 du Module « Développement et Partage de la Connaissance » et vise à réaliser une synthèse bibliographique critique des études et des méthodologies existantes pour estimer l'évolution des morphologies côtières en réponse à l'augmentation du niveau marin.

L'augmentation du niveau de la mer et son accélération probable au cours du siècle entrainera des évolutions du paysage littoral. Ces évolutions correspondent à des adaptations de la frange côtière à l'augmentation du niveau marin, et peuvent se traduire par une érosion accrue, le recul des cordons naturels par roulement sur eux-mêmes, l'ouverture de lidos par rupture des cordons, l'érosion et l'abaissement du niveau des plages lorsque le recul est contraint par des infrastructures ou des fronts urbains. Ces adaptations des géomorphologies côtières ont été analysées à partir d'observations historiques, sédimentologiques ou géologiques. Toutefois, la projection de ces schémas au littoral actuel du Languedoc-Roussillon, fortement urbanisé, est délicate.

Des évaluations empiriques pour évaluer le recul des plages associé à la hausse du niveau de la mer existent. Elles se basent généralement sur la loi de Brüun (1962) qui prédit les vitesses de recul en s'appuyant sur des hypothèses de conservation du sédiment et de translation du profil. Cette loi, largement utilisée dans la littérature, a montré de nombreuses limites et de nombreuses adaptations ont été proposées pour prendre en compte la variabilité des contextes géomorphologiques.

Certains développements numériques s'appuient sur ces approches conceptuelles pour proposer des évolutions à long terme (Cowell *et al.*, 2006), c'est le cas des modèles semi-empiriques Genesis ou Unibest, ou des modèles comportementaux.

Plus récemment, de nombreuses études ont été menées sur des secteurs sur lesquels l'augmentation récente du niveau marin a été extrêmement rapide. C'est notamment le cas sur le littoral de la mer Caspienne où la diversité des géomorphologies côtières est représentée, et où le niveau marin montre une variabilité très importante avec une élévation de plus de 2 m depuis 1978 (Kaplin et Selivanov, 1995), soit plus de 10 cm par an.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Généralités sur l'état actuel des connaissances sur la réponse du littoral à l'élévation du niveau marin	11
2.1. EVOLUTION THEORIQUE DU TRAIT DE COTE D'UN LITTORAL SABLEUX	11
2.2. OBSERVATIONS IN SITU EN MER CASPIENNE DANS LE CAS D'UNE REMONTEE RAPIDE DU NIVEAU DE LA MER	13
3. Présentation des modèles de processus et des modèles comportementaux ..	17
3.1. LES CONCEPTS DE BASE DES MODELES.....	17
3.2. EXEMPLES DE MODELES	19
3.2.1. Les modèles d'ingénierie moyen-terme simplifiés	19
3.2.2. Les modèles d'analyse de stabilité linéaire	21
3.2.3. Les modèles d'ingénierie long terme	22
a. Le modèle GENESIS.....	22
b. Le modèle GENCADE.....	25
c. Le modèle UNIBEST-CL+	26
3.2.4. Les modèles basés sur la loi de Brünun.....	28
a. La méthode de Kriebel et Dean (1985)	31
b. La méthode généralisée de Dean et Mauremeyer (1983).....	32
c. La méthode de Mehta et al. (1991)	33
d. La loi de Brünun couplée au recul historique	34
3.2.5. Les modèles de prédiction à l'échelle des temps géologiques	35
4. Présentation des modèles statistiques	39
4.1. LES MODELES BASES SUR LES TENDANCES HISTORIQUES	39
4.1.1. La méthode de régression linéaire	39
4.1.2. La méthode de Fenster <i>et al.</i> (1993)	41
4.1.3. La méthode des points extrêmes (Himmelstoss, 2009)	42
4.1.4. La méthode de la moyenne des taux (AOR Average Of Rate)	43

4.2. LES MODELES BASES SUR DES FONCTIONS MATHEMATIQUES.....	45
4.2.1. Modèles statistiques.....	45
a. L'écart-type	45
b. L'analyse de corrélation.....	46
c. La méthode de Fourier	46
d. L'analyse de corrélation canonique	47
4.2.2. La fonction empirique orthogonale (EOF).....	47
5. Présentation des méthodes qualitatives.....	49
5.1. L'AVIS D'EXPERT.....	49
5.2. LA ZONE TAMPON.....	49
5.3. L'INDICE DE VULNERABILITE COTIERE « COASTAL VULNERABILITY INDEX » (CVI).....	51
6. Approches diverses.....	55
6.1. L'APPROCHE PROBABILISTE	55
6.2. L'APPROCHE SYSTEMIQUE.....	57
7. Conclusion.....	59
8. Bibliographie	65

Liste des illustrations

Illustration 1 – Morphologie actuelle du littoral du Languedoc-Roussillon.....	11
Illustration 2 – Modèles d'évolution d'une lagune littorale dans une conjoncture d'élévation du niveau marin (Paskoff, 2001). A : le cordon littoral qui isole la lagune de la mer migre vers la terre en roulant sur lui-même à une vitesse liée à celle de l'élévation du niveau de la mer ;	12
Illustration 3 – Migration du cordon littoral au sud-ouest de Palavas lors de la tempête de novembre 1982 (d'après SOGREA, 1984).	12
Illustration 4 – Carte de situation de la Mer Caspienne.....	13
Illustration 5 – Différents types d'évolution naturelle de la zone côtière durant l'élévation du niveau marin. Les différences entre les schémas sont contrôlées par les différentes pentes.	14

Illustration 6 – Evolution d’un profil de plage parallèlement à lui-même (source : www.coastalwiki.org).....	18
Illustration 7 – Géométrie d’une section de côte (source : www.coastalwiki.org).....	18
Illustration 8 - Bloc diagramme représentant le concept « N-line » (Idier et Pedreros, 2004).	19
Illustration 9 – Avantages et limites des modèles d’ingénierie moyen-terme.	20
Illustration 10 – Mécanisme d’instabilité en croissants (Idier et Pedreros, 2004).....	21
Illustration 11 – Avantages et limites de l’analyse de stabilité linéaire.	22
Illustration 12 – Exemple d’application du modèle GENESIS.....	23
Illustration 13 – Avantages et limites du modèle GENESIS.	24
Illustration 14 - Les variations du trait de côte de Whestampton Beach sur 15 ans (Hanson et al., 2010).....	25
Illustration 15 – Avantages et limites du modèle GENCADE.....	26
Illustration 16 – Modélisation du trait de côte après rechargement de plage (De Bruijn et Erbrink, 2005).....	27
Illustration 17 – Avantages et limites du modèle Unibest-CL+.	28
Illustration 18 – Principe de la loi de Brüun (Yates Michelin et al., 2010).....	29
Illustration 19 – Exemple d’application de la loi de Brüun à Carnon plage avec 4 scénarios différents de l’élévation du niveau marin (Yates Michelin et al., 2010).	30
Illustration 20 – Avantages et limites de la loi de Brüun.	30
Illustration 21 – Avantages et limites de la méthode de Kriebel et Dean.	32
Illustration 22 – Paramètres utilisés dans la loi généralisée de Brüun (modifié d’après Cowell et al., 2006).	33
Illustration 23 – Avantages et limites de la méthode généralisée de Dean et Mauremeyer.	33
Illustration 24 – Avantages et limites de la méthode de Mehta et al.	34
Illustration 25 – Avantages et inconvénients de la loi de Brüun couplée au recul historique.....	35
Illustration 26 – Schéma du Concept en Cascade de Cowell et al. (2003).	36
Illustration 27 – Schéma des différentes morphologies comprises dans le « Coastal Tract » (Cowell et al., 2003).	36
Illustration 28 – Modèles utilisés dans le projet PACE (CP= Cross-shore Profile DV dimensionnal Vertical representation of depth integrated sediment dynamics).	37
Illustration 29 – Tableau des différents sites où ont été appliqués les modèles (source : Cowell et al. 2003).	37
Illustration 30 – Présentation de la méthode de régression linéaire (Durand et Heurtefeux, 2006).	40
Illustration 31 – Avantages et limites de la méthode de régression linéaire.....	41
Illustration 32 – Présentation de la méthode de Fenster et al.(1993).	42

Illustration 33 – Avantages et limites de la méthode de Fenster et al.(1993).	42
Illustration 34 – Illustration du principe de la méthode des points extrêmes (Himmelstoss, 2009).....	43
Illustration 35 – Avantages et limites de la méthode des points extrêmes.....	43
Illustration 36 – Illustration du mode de calcul de l'AOR (source : Dolan et al. 1991).	44
Illustration 37 – Avantages et limites de la méthode de la moyenne des taux (AOR).	45
Illustration 38 – L'écart-type en élévation en fonction du profil d'élévation moyen pour 4 profils différents (Larson et al, 2003).	46
Illustration 39 – Principe des Fonctions EOF pour les plages de Terschelling (Larson et al, 2003).	48
Illustration 40 – Avantages et Inconvénients des modèles basés sur les fonctions mathématiques.	48
Illustration 41 – Avantages et limites de l'avis d'expert.	49
Illustration 42 – Exemple d'application d'une zone tampon de 500 mètres à Narbonne-Plage.....	50
Illustration 43 – Avantages et limites de la zone tampon.	50
Illustration 44 – Paramètres utilisés par Gornitz (1991) pour caractériser le CVI.	51
Illustration 45 – Niveau d'importance de chaque paramètre inclus dans la calcul du CVI (Gornitz, 1991).	51
Illustration 46 – Paramètres physiques et humains pris en compte dans le calcul du CVI (Özyurt et al., 2010a).	52
Illustration 47 – Matrice du CVI (SLR) générée pour le littoral d'Amasra (Özyurt et al., 2010b).	54
Illustration 48 – Avantages et limites de la limite du CVI.	54
Illustration 49 – Exemple de la fonction de densité normale du recul (R) du trait de côte (Cowell et al, 2006).....	56
Illustration 50 – Tableau regroupant les avantages et limites de la méthode probabiliste.....	57
Illustration 51 – Diagramme illustrant la méthode intégrée de Brommer et Bochev-van der Burgh (2009).....	58
Illustration 52- Exemple d'évolution long terme sur le littoral de Palavas-les-Flots (Yates Michelin et al., 2010).....	62
Illustration 53 – Tableau de comparaison des différentes méthodes d'analyse de l'évolution du trait de côte synthétisées dans ce rapport.....	64

1. Introduction

L'augmentation du niveau de la mer et son accélération probable au cours du siècle entrainera des évolutions du paysage littoral. Ces évolutions correspondent à des adaptations de la frange côtière à l'augmentation du niveau marin, et peuvent se traduire par une érosion accrue, le recul des cordons naturels par roulement sur eux-mêmes, l'ouverture de lido par rupture des cordons, l'érosion et l'abaissement du niveau des plages lorsque le recul est contraint par des infrastructures ou des fronts urbains.

Les enjeux socio-économiques importants ainsi que la forte population résidant sur le littoral très urbanisé du Golfe du Lion, rendent nécessaire l'étude de l'évolution future à long-terme du trait de côte en Languedoc-Roussillon, causée par les changements climatiques. Le but de cette étude est d'anticiper sur les risques encourus sur la zone littorale et ainsi adopter une politique adéquate entre enjeux économiques et environnementaux.

D'après le rapport de 2007 du GIEC¹, un changement climatique se produirait depuis la révolution industrielle, engendré par l'émission de gaz à effet de serre. Celui-ci a pour conséquence, entre autre, une accélération de l'élévation du niveau marin ainsi qu'un changement de comportement du régime de vagues.

Une prédiction future de l'évolution du trait de côte n'est jamais exacte. La complexité des processus physiques responsables de la dynamique côtière et de leurs relations, rendent la modélisation de l'évolution du système côtier à long terme difficile. Cependant une multiplicité de méthodes existe afin d'estimer au mieux cette évolution. Celles-ci sont classées en 4 groupes :

- les modèles de processus « process-based model » ;
- les modèles comportementaux « behaviour-based model » ;
- les modèles statistiques « statistic-based model » ;
- les modèles basés sur une approche qualitative.

Après un bref rappel de l'évolution des morphologies côtières en réponse à l'élévation du niveau de la mer, ce rapport présente successivement ces quatre types de modèles avant d'établir une comparaison critique entre tous les modèles afin de déterminer lesquels seraient susceptibles d'être utilisés à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon pour estimer l'évolution future du trait de côte.

¹ GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

2. Généralités sur l'état actuel des connaissances sur la réponse du littoral à l'élévation du niveau marin

2.1. EVOLUTION THEORIQUE DU TRAIT DE COTE D'UN LITTORAL SABLEUX

L'augmentation du niveau de la mer et son accélération probable au cours du 21^{ème} siècle entraineront indéniablement des évolutions du paysage littoral.

La morphologie des littoraux sableux microtidaux se présente sous forme de longues étendues de sable appelées cordons littoraux, qui, au fil du temps et sous l'action de la dérive littorale ont isolé de nombreux étangs arrière-littoraux ainsi que des lagunes plus ou moins vastes (cf. illustration 1).

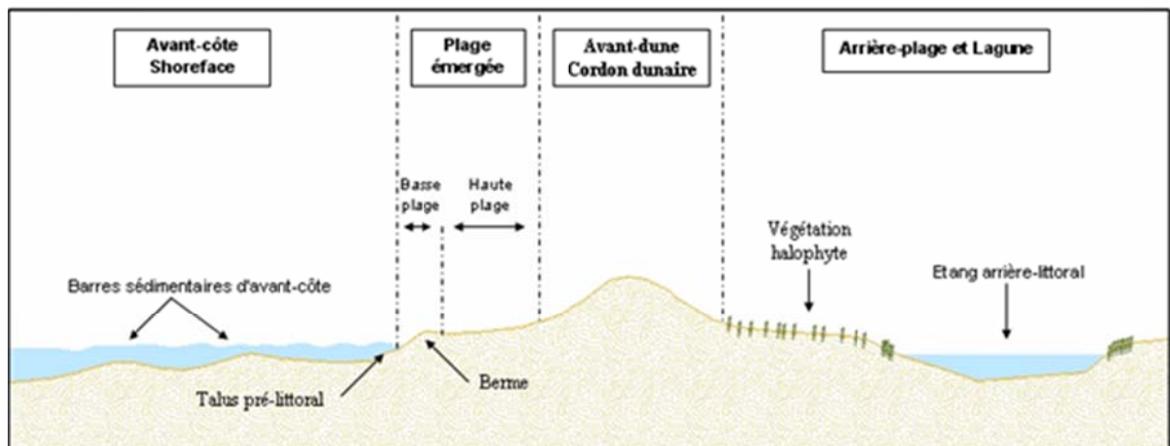


Illustration 1 – Morphologie actuelle du littoral du Languedoc-Roussillon.

L'élévation du niveau marin au cours du 21^{ème} siècle pourrait entrainer un approfondissement et une extension des lagunes existantes. Cependant, l'augmentation de l'épaisseur de la tranche d'eau pourrait ne pas se manifester si la sédimentation est active et que la subsidence est importante. L'élévation du niveau marin aura alors pour seul effet de retarder le colmatage des étangs arrière-littoraux. L'accroissement de leur superficie dépend du comportement morpho-sédimentaire des cordons littoraux qui les isolent de la mer. Un apport important en sédiments par la dérive littorale pourrait permettre le maintien et la stabilité de ces cordons grâce à leur épaissement et leur surélévation. Cependant, ce scénario paraît peu probable en raison de la pénurie actuelle d'apports sédimentaires sur les côtes sableuses basses du Languedoc-Roussillon.

Deux possibilités d'évolution sont alors envisagées (cf. illustration 2) :

- une migration des cordons littoraux vers les terres (A) ;
- une submersion des cordons littoraux (B).

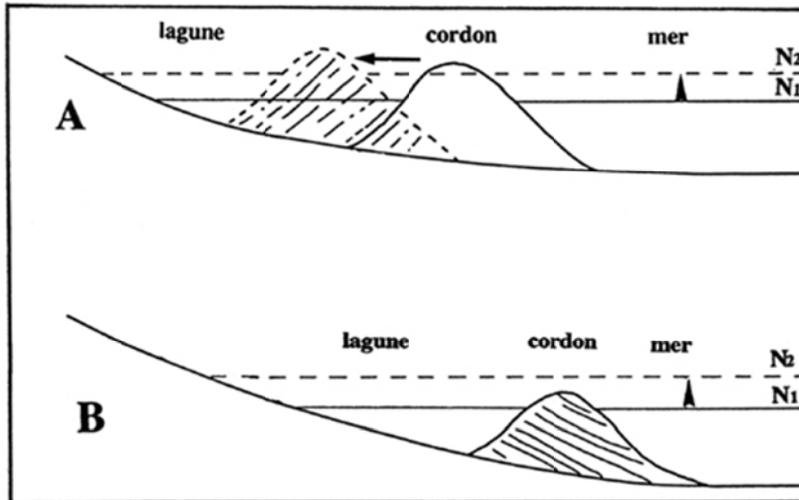


Illustration 2 – Modèles d'évolution d'une lagune littorale dans une conjoncture d'élévation du niveau marin (Paskoff, 2001). A : le cordon littoral qui isole la lagune de la mer migre vers la terre en roulant sur lui-même à une vitesse liée à celle de l'élévation du niveau de la mer ; B : le cordon littoral ne bouge pas, il est progressivement submergé et la lagune disparaît, laissant place à la mer ouverte.

• **Migration des cordons littoraux vers l'intérieur des terres**

Ce scénario est le plus probable dans les circonstances actuelles de pénurie sédimentaire. Cette migration est souvent accompagnée de l'amincissement des cordons et de l'ouverture de brèches pouvant conduire à terme à leur disparition et par conséquent à celle des étangs arrière-littoraux et des lagunes.

On a déjà pu constater ce phénomène en Languedoc-Roussillon lors des fortes tempêtes marines notamment celle de novembre 1982. Le cordon littoral qui isole l'étang de Pierre-Blanche (sud-ouest de Palavas) s'est déplacé de plus de 20 mètres (cf. illustration 3).

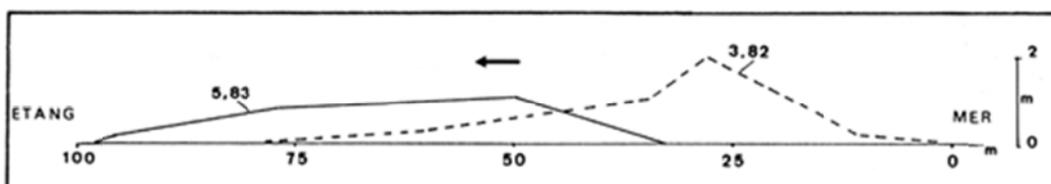


Illustration 3 – Migration du cordon littoral au sud-ouest de Palavas lors de la tempête de novembre 1982 (d'après SOGREAH, 1984).

Cette évolution devrait s'accélérer avec l'augmentation de la vitesse d'élévation du niveau marin.

- **Submersion des cordons littoraux**

Dans ce cas de figure, l'élévation du niveau marin ne provoquerait aucune remobilisation des cordons littoraux mais uniquement une submersion totale de ces derniers. Cette submersion entrainerait donc une disparition des étangs arrière-littoraux et des lagunes laissant alors place à la mer ouverte.

L'identification et la datation d'anciens cordons sous plusieurs dizaines de mètres de profondeur attestent que ce phénomène s'est déjà produit au cours de la transgression postglaciaire. Il implique cependant un taux d'élévation rapide du niveau marin de l'ordre du cm/an.

2.2. OBSERVATIONS IN SITU EN MER CASPIENNE DANS LE CAS D'UNE REMONTEE RAPIDE DU NIVEAU DE LA MER

Kaplin et Selivanov (1995) ont pu observer la réponse morphologique de différents types de côtes à l'augmentation du niveau marin en mer Caspienne (cf. illustration 4).



Illustration 4 – Carte de situation de la Mer Caspienne.

Le littoral de la mer Caspienne représente en effet toute la diversité des géomorphologies côtières dans la mesure où son littoral présente à la fois des côtes sableuse, rocheuses, vaseuses et deltaïques. Par ailleurs, le niveau marin dans cette zone montre une variabilité très importante avec une montée de plus de 2 m depuis

1978, soit un taux supérieur à 10 cm par an. L'observation du comportement de ces différents types de littoraux face à cette remontée rapide du niveau peut donc permettre d'appréhender l'évolution du trait de côte en fonction de la géomorphologie et de la pente de la plage et de l'avant-côte.

- La côte vaseuse

C'est une côte de pente très faible ($<0,0001$) constituée de vase. Kaplin et Selivanov ont observé dans le bassin nord de la mer Caspienne, plus précisément dans la baie de Kirov, que face à l'augmentation du niveau marin ce type de côte, où la pente est inférieure à 0,0005, subit une inondation passive sans changements de profil et sans redistribution du sédiment (cf. illustration 5a). Ce concept d'inondation, qui consiste à faire une translation du niveau marin sur un profil pour symboliser l'élévation de la mer, a été utilisé par Durand et Heurtefeux (2006) sur les étangs de Vic et de Pierre Blanche entre les plages des Aresquiers et de Villeneuve-lès-Maguelone dans l'Hérault.

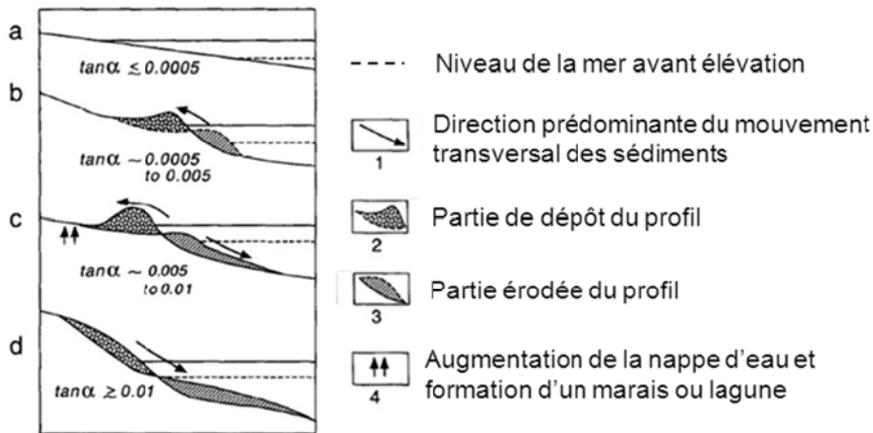


Illustration 5 – Différents types d'évolution naturelle de la zone côtière durant l'élévation du niveau marin. Les différences entre les schémas sont contrôlées par les différentes pentes.

- La côte sableuse

Kaplin et Selivanov ont pu observer un mouvement vers l'intérieur des terres et une érosion du trait de côte au cours de l'élévation du niveau marin. Le modèle de réponse à l'élévation du niveau marin varie cependant d'un segment à l'autre en fonction notamment de la pente.

Pour les avant-côtes dont la pente est relativement douce (0,0005-0,005), il y a retrait vers les terres sans reformation (cf. illustration 5b). La zone où a été observée cette évolution se situe au Sud de la Mer Caspienne près de la ville de Lenkoran en Azerbaïdjan. Ce segment de côte est caractérisé par 3 à 4 barres sédimentaires d'avant-côte et une pente modérée de 0,003 à 0,005. Durant l'élévation du niveau marin, la plage préserve ses dimensions mais les barres sédimentaires changent avec

les fortes tempêtes. La dune reste stable mais on observe un recul du trait de côte. Sur ce type de plage si l'apport de sédiment (éolien, fluvial, érosion des falaises) est important le trait de côte peut progresser sur la mer.

Lorsque la pente de l'avant-côte est modérée (0,005-0,01), l'élévation du niveau marin cause une élévation et une émergence de la barre sableuse sur la plage et l'augmentation du niveau de la nappe d'eau provoque la formation d'une lagune (cf. illustration 5c). La largeur de la plage diminue et il y a un net recul du trait de côte. La loi de Brüun généralisée apparaît comme la meilleure méthode pour représenter cette évolution.

Lorsque la pente est supérieure à 0,01, l'élévation du niveau marin provoque un taux de destruction de la côte et un recul du trait de côte important (cf. illustration 5d). Si la pente de l'arrière côte est raide (0,03-0,05), il n'y a pas formation de lagune.

- Les côtes deltaïques

Leur évolution dépend de l'importance relative des processus fluviaux ou marins et surtout de l'importance des apports fluviaux. Kaplan et Selivanov ont observé que la plupart des fronts deltaïques avec une île sont sujets à une intense érosion. Par exemple le front du delta de la rivière Kura recule de 10-15m par an et l'île de Morskoi Ochirkin qui mesurait près de 0,5km de long en 1970 a totalement disparu à la fin de l'année 1982.

Cependant, la tendance évolutive de la plupart des zones des deltas de la Volga, de l'Ural et de Terek ne change pas durant la période d'élévation du niveau marin. L'inondation passive des zones basses du delta de la Volga semble être le modèle prédominant. Le delta de Terek est en progradation du fait d'une source en sédiment importante.

- Les côtes rocheuses

Les côtes rocheuses subissent une forte érosion avec l'élévation du niveau marin. La pente affecte l'importance de l'érosion. En effet si la pente de l'avant-côte est douce l'érosion sera moindre et inversement si la pente est raide.

Toutes ces observations vont être importantes pour valider certains modèles prédictifs utilisés par les observations de terrain.

3. Présentation des modèles de processus et des modèles comportementaux

Les modèles de processus et les modèles comportementaux sont les deux types de modèles les plus utilisés en modélisation côtière.

Les **modèles de processus** (process-based model) sont basés sur la représentation des processus physiques et incluent les forçages liés aux vagues et aux courants entrant en jeu dans la dynamique littorale. La complexité de ces processus physiques rend la modélisation numérique long-terme difficile notamment à cause d'un temps de calcul trop élevé. Ce temps de calcul élevé finit par créer une dégénérescence dans la modélisation ce qui entraîne d'importantes incertitudes sur le modèle final. Ainsi, les modèles de processus sont utilisés le plus généralement pour connaître l'évolution à court-terme de la côte.

Les **modèles comportementaux** (behaviour-based model) sont définis comme des modèles phénoménologiques dans lesquels les processus physiques, impliqués dans l'évolution côtière, sont simplifiés en utilisant des formules semi-empiriques. Du fait de la simplification des processus ces modèles sont plus stables pour les modélisations à long terme mais demandent cependant un jeu de données de terrain important d'où la difficulté de le mettre en place. Un modèle comportemental est développé pour simuler les comportements connus, tel que la tendance d'une plage à se développer vers une forme d'équilibre, plutôt que les processus à partir desquels ce comportement provient.

En réalité, tous les modèles sont à la limite entre les modèles de processus et les modèles comportementaux puisqu'aucun modèle ne prend en compte la totalité des processus physiques impliqués dans la dynamique côtière. De plus, ils opèrent tous certaines simplifications dans les processus du fait de la complexité des processus physiques.

3.1. LES CONCEPTS DE BASE DES MODELES

La plupart des modélisations sur l'évolution à long terme du trait de côte se basent sur deux représentations du système côtier :

- la représentation « One-line » ;
- la représentation « N-line ».

- La théorie « One-line » est caractérisée par deux hypothèses fortes. La première de ces hypothèses est basée sur l'observation que les profils de plage gardent une forme moyenne qui leur est caractéristique. D'après Pelnard-Considère (1956), le profil de plage se déplace parallèlement à lui-même. En d'autres termes, il se produit une translation vers la côte ou vers la mer sans changements de forme au cours de l'érosion ou de l'accrétion (cf. illustration 6). La deuxième hypothèse part du principe que les sédiments sont transportés le long de la côte entre deux limites bien définies. La limite sur la côte correspond au sommet de la berme active D_b et la limite

en mer correspond à la profondeur de fermeture² D_c . Les variations longshore du flux de transport sédimentaire contrôlent les changements de position du trait de côte en suivant la loi de conservation de la masse.

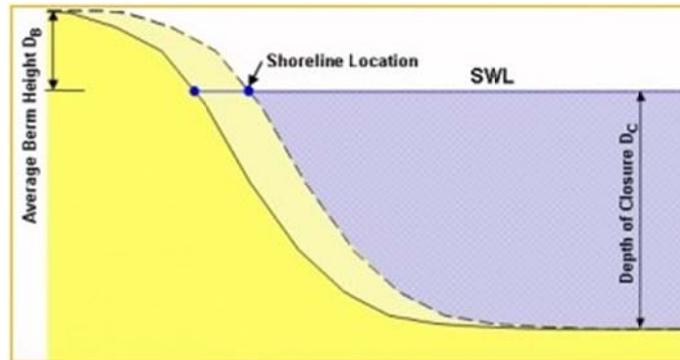


Illustration 6 – Evolution d'un profil de plage parallèlement à lui-même (source : www.coastalwiki.org).

L'illustration 7 représente schématiquement le changement de position de trait de côte (Δy) et la longueur du segment de trait de côte considéré (Δx). Le volume de la section ($\Delta V = \Delta x \Delta y (D_c + D_b)$) est déterminé par les flux sédimentaires entrant et sortant dans la section. Il est supposé que ce flux est principalement dû à la drifte littorale (Q), l'effet des courants de marée, du vent et des autres facteurs sur le transport sédimentaire sont négligés. Le changement de volume dans la section peut alors s'écrire $\Delta V = \Delta Q \Delta t$.

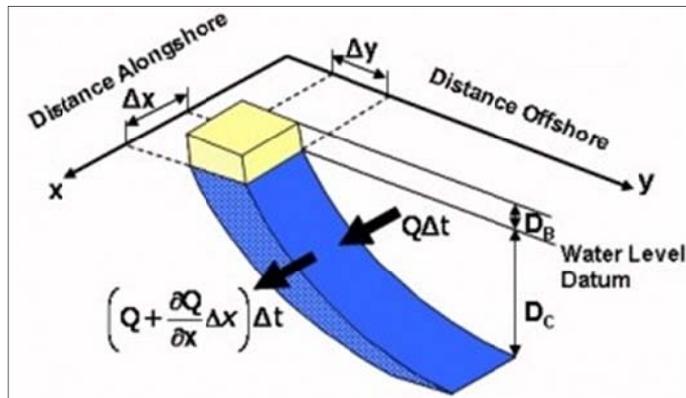


Illustration 7 – Géométrie d'une section de côte (source : www.coastalwiki.org).

Le modèle « One-line » peut également être appliqué à l'étude de l'évolution de l'avant-côte à l'aide de profils transversaux. Ce type de modèle suit les mêmes principes, c'est-à-dire que le profil garde sa forme au cours de son évolution. Toutefois,

² Profondeur au-delà de laquelle la plage sous-marine n'enregistre plus de changements significatifs.

les transports transversaux sont négligeables sur le long terme d'où une application limitée au court ou moyen terme de ce concept « One-line » transversal.

- Ce type de modèle « One-line » a été étendu en modèle « N-line ». Le principe est d'étendre le modèle pour qu'il simule une série de lignes iso-contours. Ce modèle fonctionne en schématisant la plage par des compartiments entre des lignes iso-contours dans la direction transversale (cf. illustration 8). Chaque section ainsi délimitée est considérée comme un modèle « One-line » lié aux compartiments adjacents par le transport transversal. Ce transport est exprimé de façon à ce que les compartiments soient en configuration d'équilibre.

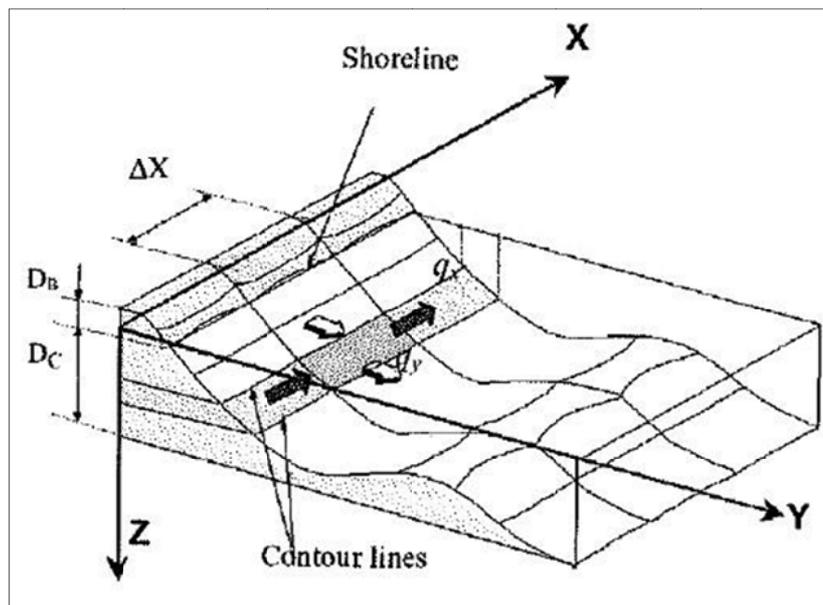


Illustration 8 - Bloc diagramme représentant le concept « N-line » (Idier et Pedreros, 2004).

3.2. EXEMPLES DE MODELES

On a pu voir dans les paragraphes précédents que la distinction entre les modèles de processus et les modèles comportementaux était parfois difficile. Dans la partie suivante, nous allons donc présenter les différents modèles utilisés pour estimer l'évolution à long terme du trait de côte en partant des modèles de processus pour aller vers les modèles comportementaux.

3.2.1. Les modèles d'ingénierie moyen-terme simplifiés

Deux types de simplification existent pour les modèles d'ingénierie court-moyen terme :

- une simplification au niveau de la morphologie ;
- une simplification au niveau des couplages.

Le modèle 2DH hybride exposé par Kristensen *et al.* (2011) est un exemple d'illustration de simplification de la morphologie. Les modèles 2DH calculent les transformations de l'énergie des houles, de leurs angles et de leurs périodes en mer jusqu'à la côte, et utilisent cette information pour construire un modèle de flux qui donne le champ des courants profonds selon les deux directions horizontales. A partir de ces courants et des caractéristiques des vagues, le champ de distribution de sédiments est calculé ce qui permet alors d'obtenir la morphologie de la côte.

Ce genre de modèle inclut les effets d'une non-uniformité de la bathymétrie et incorpore la présence des structures côtières réfléchant les vagues ou bloquant le courant. Ils donnent ainsi une bonne simulation pour l'évolution détaillée du trait de côte autour des épis.

Leur application au long-terme reste délicate car le temps de calcul est trop long et crée des dégénérescences dans l'estimation des profils transversaux.

Cependant, le modèle hybride utilisé par Kristensen *et al.* (2011) permet une application long-terme. En effet, il utilise une simplification identique à la paramétrisation simple de la morphologie côtière du concept « One-line ». L'idée principale est d'utiliser le modèle 2DH pour représenter l'hydrodynamisme et le transport sédimentaire sur une bathymétrie non-uniforme incluant les effets des structures côtières puis de coupler cette information avec une morphologie basée sur une paramétrisation simple comme par exemple le concept « One-line ».

La simplification des couplages se fait sur des modèles comme Telemac ou encore Delft 3D qui permettent d'estimer l'hydrodynamisme, le flux de sédiments et la morphologie du fond. Des chercheurs comme Latteux (1995) utilisent le filtrage de processus en représentant par exemple N marées par une seule marée N fois plus longue dans le modèle. Chesher and Miles (1992) proposent une méthode dite de vague représentative ; les différents types de houle sont ainsi intégrés dans une seule houle représentative. Les deux méthodes précédemment citées permettent un gain de temps dans la modélisation pour le couplage courants de marée/fond et le couplage houle/fond ce qui permet l'application plus long terme des modèles.

L'illustration 9 présente les avantages et limites de ce genre de modèles.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bathymétrie ✓ Caractéristiques des houles (direction, période, énergie...) ✓ Localisation et type de structures existantes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temps de calcul diminué donc possibilité de prévision long terme sans dégénérescence ✓ Basé sur des modèles dont le résultat est satisfaisant à court et moyen terme 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ N'inclut pas forcément les processus importants sur le long terme ✓ Inclut uniquement les processus pris en compte sur le court terme

Illustration 9 – Avantages et limites des modèles d'ingénierie moyen-terme.

3.2.2. Les modèles d'analyse de stabilité linéaire

Dans le cas d'une bathymétrie périodique, par exemple une bathymétrie où l'on distingue une régularité particulière, avec des longueurs et hauteurs bien identifiées (ex : barres littorales), l'analyse de stabilité des équations hydro-sédimentaires est un outil adapté.

En entrée, ces modèles nécessitent des données de courant, hauteur d'eau, houle, granulométrie. Mais seule une donnée représentative est nécessaire, il nécessite donc moins de données que les modèles classiques.

En sortie, ils fournissent le courant, les flux de sédiments et les évolutions bathymétriques.

Par exemple, pour étudier les barres littorales, l'état de base est souvent associé à une plage à pente uniforme et les équations sont résolues pour cet état de base. Celui-ci est ensuite modifié par des perturbations bathymétriques de faible hauteur. Dans certains cas, ces variations vont être amorties ; dans d'autres cas, elles vont être amplifiées et vont évoluer vers des figures bathymétriques périodiques de hauteur finie. L'illustration 10 présente ce phénomène d'instabilité pour le cas de croissants de plage via une expérience de laboratoire où l'on voit ces croissants se développer en partant d'une plage à pente uniforme.

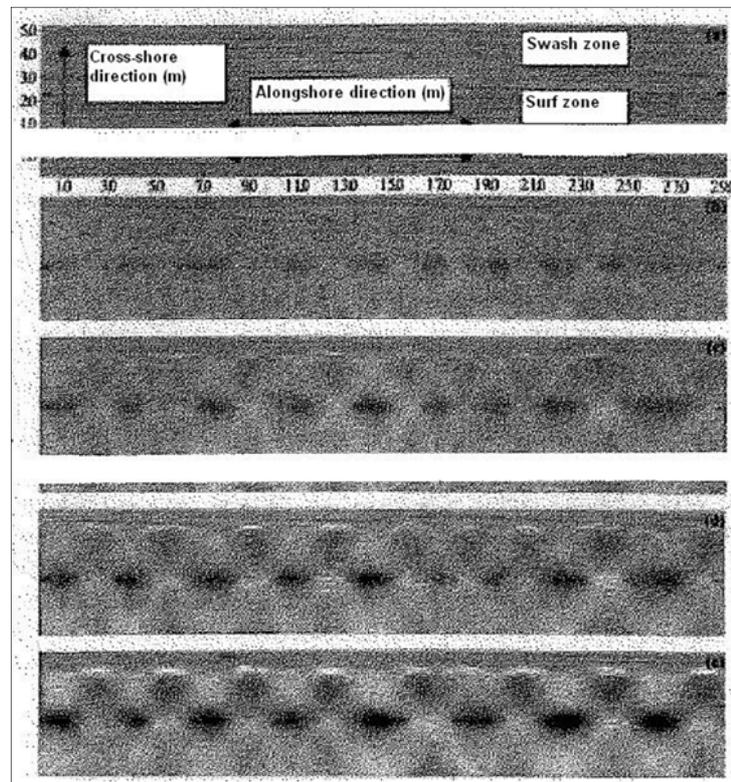


Illustration 10 – Mécanisme d'instabilité en croissants (Idier et Pedreros, 2004).

L'illustration 11 présente les avantages et limites des modèles d'analyse de stabilité linéaire ainsi que les données de base nécessaires à leur application.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Données de courants ✓ Hauteur d'eau ✓ Caractéristiques des houles ✓ Granulométrie des sédiments 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nécessite moins de données que les modèles classiques (Telemac...) ✓ Ne coûte pas cher en temps de calcul ✓ Analyse de processus plus facile 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réalisation d'une analyse de stabilité très complexe ✓ Pas de modèles d'analyse de stabilité distribués en ligne ✓ Problème de validation de la méthode

Illustration 11 – Avantages et limites de l'analyse de stabilité linéaire.

3.2.3. Les modèles d'ingénierie long terme

Les modèles d'ingénierie semi-empiriques long terme utilisés sont nombreux GENESIS, UNIBEST-LC+,... De plus, un prototype est en construction : GenCade. Ce nouveau logiciel est une combinaison de deux logiciels préexistants: GENESIS et CASCADE.

a. Le modèle GENESIS

Le modèle GENESIS (GENeralized Model for Simulating Littoral Change) a été créé par Hanson et Kraus (1989). Il s'agit d'un modèle numérique semi-empirique destiné à simuler les changements à long terme de la ligne de rivage en réponse à l'implantation d'équipements littoraux susceptibles de modifier le transport sédimentaire longitudinal. Ce modèle suit le concept « One-line » (cf. partie 3.1) et repose donc sur trois hypothèses fondamentales :

- Les variations de la position du trait de côte à long terme sont exclusivement liées au transport longitudinal. Les changements transversaux liés aux tempêtes ne sont pas pris en compte.
- Le transit longitudinal est lié exclusivement aux courants de vagues, en fonction de l'angle d'incidence et de la hauteur de déferlement. Les transports de courants de marée ou de courants générés par les vents ne sont pas pris en compte. Cependant, le modèle peut intégrer l'effet d'une infrastructure, d'un rechargement ou d'une extraction de plage sur le transit (cf. illustration 12).
- L'évolution du trait de côte est proportionnelle au volume de sédiments apportés ou prélevés par le transit sédimentaire sur le profil vertical. Sa translation se fait jusqu'à un point stable correspondant à la limite de fermeture.

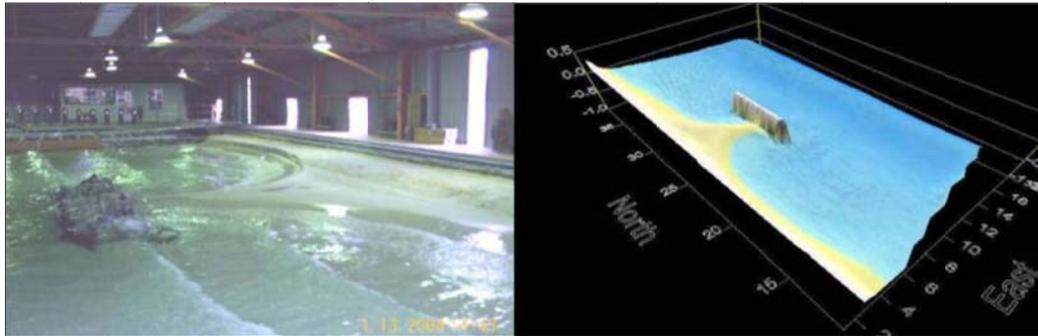


Illustration 12 – Exemple d'application du modèle GENESIS.

Ce modèle à une dimension n'utilise que le trait de côte pour représenter l'évolution de la plage. Il suffit de calculer le transit longitudinal entre 2 dates pour obtenir les variations de la position de la ligne de rivage entre ces deux mêmes dates. Il faut donc déterminer les variations du transit en fonction des différents régimes de houles et d'autres facteurs qui interviennent dans la dynamique côtière. Ces calculs sont réalisés selon différentes équations :

- l'équation de déferlement des vagues ;
- l'équation d'équilibre de la plage ;
- l'équation du transit longitudinal ;
- l'équation de la variation de la position du trait de côte ;

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle sont nombreuses :

- la position du trait de côte à différentes époques ;
- les profils de plage (hauteur de la berme, profondeur de fermeture) ;
- les caractéristiques des houles ;
- le type de structures existantes ;
- la localisation et le degré de perméabilité des infrastructures au transit sédimentaire ;
- les dates et volumes des rechargements et/ou extractions de plages.

A partir de toutes ces données, le programme va recourir à une série d'équations complexes pour prévoir l'évolution du trait de côte.

Ce modèle a été utilisé dans le projet EUROSION (2004) et appliqué sur les plages du Languedoc-Roussillon par Paul Durand (1999).

Avantages

Le modèle peut être appliqué à une grande variété de situations comportant au choix des épis, des jetées, des brise-lames, des digues en indiquant leurs caractéristiques (nombre, localisation...) ou encore des rechargements de plage en indiquant les volumes de sable apportés....

Limites

Le modèle GENESIS possède quatre inconvénients majeurs.

La première critique qui peut être faite est l'incertitude des hypothèses de base du modèle. Le modèle ignore une dimension fondamentale de l'évolution des littoraux à savoir l'impact des mouvements transversaux particulièrement actifs lors de fortes tempêtes (mouvements prédominants à Sète et au Cap d'Agde).

La seconde critique est faite sur les données utilisées qui sont souvent des moyennes. Ceci est le cas pour les enregistrements de houle. Ces enregistrements sont entrés sous forme de classes qui ne prennent pas en compte les conditions extrêmes. D'autres données importantes comme la profondeur d'accumulation, la hauteur de la berme et la pente moyenne sont considérées comme constantes dans le temps et l'espace.

La troisième critique émise repose sur l'imperfection des équations. Par exemple, l'équation du transit sédimentaire considère que la pente du profil est uniforme. Ces équations comportent des paramètres totalement empiriques ajustés lors de calibration et variant d'un site à l'autre. De plus, l'équation fondamentale permettant le calcul de l'évolution de la ligne de rivage suppose que les gains ou pertes de sédiments s'appliquent de manière proportionnelle le long du profil (du haut de la berme à la profondeur d'accumulation).

La dernière imperfection du modèle est le nombre conséquent de données difficiles à déterminer avec précision.

L'ensemble des avantages et limites du modèle GENESIS est synthétisé sur l'illustration 13.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Positions du trait de côte à différentes époques ✓ Profils de plage (hauteur de la berme, profondeur d'accumulation) ✓ Caractéristiques des houles ✓ Type de structures existantes (localisation et degré de perméabilité) ✓ Dates et volumes des rechargements de plage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Peut être appliqué à une grande variété de situations ✓ Prise en compte des ouvrages de protection et des rechargements de plage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Incertitude des hypothèses de base ✓ Utilisation de données moyennées ou de valeurs constantes. Pas de prises en compte des conditions extrêmes ✓ Imperfection des équations utilisant des paramètres empiriques ajustés lors de la calibration ✓ Nombre conséquent de données difficiles à déterminer avec précision

Illustration 13 – Avantages et limites du modèle GENESIS.

b. Le modèle GENCADE

Afin de prendre en compte les changements transversaux liés aux tempêtes, un nouveau modèle numérique a été créé : GenCade. Ce modèle numérique simule les changements de la plage et de la dune en réponse aux processus transversaux responsables de l'engraissement des dunes par le vent et de leur érosion par les tempêtes, sans oublier de prendre en compte le gradient du transport sédimentaire longitudinal. Ces différents changements conditionnent les variations du trait de côte. Ainsi, GenCade reprend les principes de GENESIS pour le transport longitudinal mais intègre les changements cross-shore simulés par le logiciel Cascade.

Hanson *et al.* (2010) s'intéressent aux différents comportements de la dune vis-à-vis de l'action du vent et de l'érosion lors de tempêtes. La principale observation qui en ressort est le rôle prédominant de la berme dans les processus transversaux et donc dans l'évolution du profil de plage. Dans cette étude, Hanson *et al.* utilisent GenCade pour étudier l'évolution du trait de côte de Westhampton Beach (Etats-Unis). Dans un premier temps, ils ne prennent en compte que les processus longitudinaux (LS) puis, dans un second temps, intègrent les processus transversaux (CS). L'illustration 14 montre qu'à long-terme les processus transversaux (CS) n'affectent pas la tendance. Pour les approches long-terme, l'utilisation de GENESIS seul apparaît donc comme suffisant.

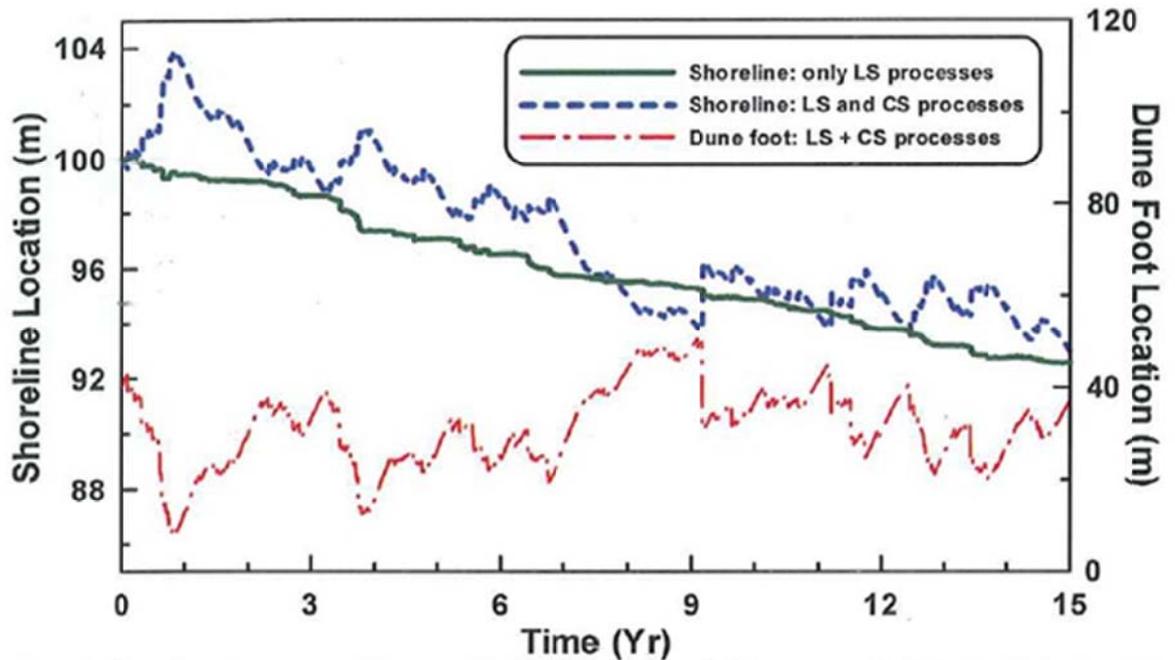


Illustration 14 - Les variations du trait de côte de Westhampton Beach sur 15 ans (Hanson *et al.*, 2010).

Les avantages et limites du modèle GENCADE sont présentés sur l'illustration 15.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Données de base du modèle GENESIS ✓ Volumes des dunes ✓ Erosion due aux vagues et au vent 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prise en compte des changements transversaux liés aux tempêtes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ensemble des inconvénients du modèle GENESIS

Illustration 15 – Avantages et limites du modèle GENCADE.

c. Le modèle UNIBEST-CL+

UNIBEST-CL+ est un modèle d'équilibre de sédiments (une partie de l'ensemble des modèles d'UNIBEST) avec lequel les transports par la dérive littorale calculés sur des points spécifiques le long de la côte peuvent être traduits en migration du trait de côte.

Ce modèle s'appuie sur quatre hypothèses :

- conservation de la masse ;
- la morphologie de la côte n'évolue pas au cours du temps ;
- une évolution du trait de côte parallèle à lui-même ;
- un transit littoral variable en fonction du temps.

L'application typique est l'analyse de la morphologie à grande échelle des systèmes côtiers pour évaluer les causes de l'érosion ou pour prévoir l'impact d'une infrastructure côtière envisagée sur la côte (par exemple un port).

Les dispositifs techniques du modèle incluent :

- une grille curviligne (qui peut être adaptée à différents types de côte : les côtes rectilignes, les deltas et les baies) ;
- le calcul de la propagation des vagues et de la dérive littorale par les vagues ;
- le transport solide de la dérive littorale et sa répartition le long de la côte peuvent être évalués ;
- les effets du transport sédimentaire par la dérive littorale sur les changements d'orientation de la côte ;
- l'entrée possible de centaines de combinaisons d'états de vague et de marée ;
- différentes formes de profils côtiers peuvent être prises en compte le long de la côte et des variations saisonnières du régime des vagues peuvent être simulées.

Ce modèle a notamment été utilisé pour comprendre l'impact des structures côtières sur l'évolution du trait de côte sur une portion de plage de deux kilomètres située entre

le cap Kaliakra et Balchik en Bulgarie (Mer Noire) par F.A. De Bruijn et C.D. Erdbrink en 2005 (cf. illustration 16).

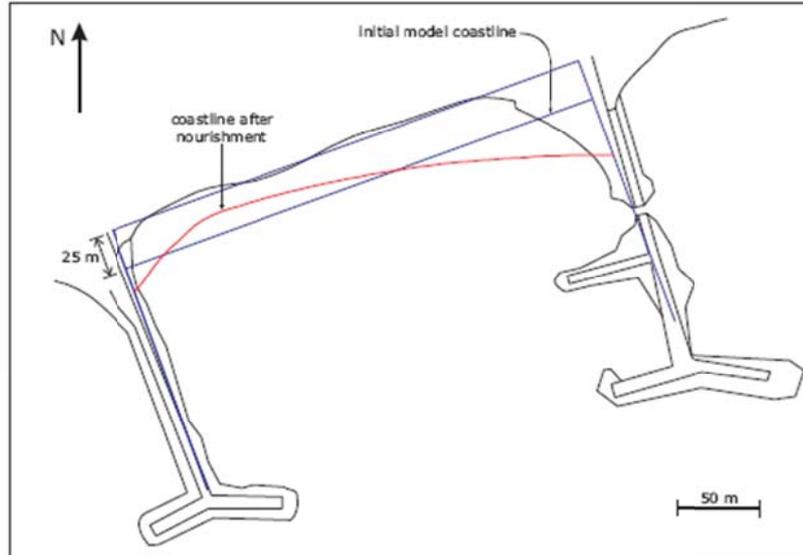


Illustration 16 – Modélisation du trait de côte après rechargement de plage (De Bruijn et Erbrink, 2005).

Avantages

Tout d'abord, le modèle UNIBEST est approprié pour l'étude de l'impact des structures côtières sur l'évolution du trait de côte. De plus, il peut être appliqué à grande échelle mais également à petite échelle, comme la prévision de l'évolution du trait de côte autour d'ouvrages de protection. Par ailleurs, on peut simuler les apports en sédiments fluviaux, l'effet de l'affaissement des terrains ou de l'élévation du niveau de la mer, la perte de sédiments vers le large, la dérivation artificielle de sédiments et l'exploitation des sables de plage.

Limites

L'un des inconvénients de ce genre de modèles d'ingénierie est le nombre de données nécessaires à son fonctionnement et sa calibration difficile. De plus, une des limites réside dans le fait que selon le concept sur lequel il se base, le transport sédimentaire se fait toujours parallèle à la côte. Cette hypothèse ne permet pas l'application du modèle sur les côtes festonnées. En d'autres termes, pour certaines géométries de côtes, l'application du modèle ne semble pas être appropriée.

L'ensemble des avantages et limites du modèle Unibest-CL+ est synthétisé dans le tableau de l'illustration 17.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Positions du trait de côte à différentes époques ✓ Profils de plage (hauteur de la berme, profondeur d'accumulation) ✓ Caractéristiques des houles ✓ Type de structures existantes (localisation et degré de perméabilité) ✓ Dates et volumes des rechargements de plage ✓ Volumes des dunes ✓ Erosion due aux vagues et au vent 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modèle approprié pour l'étude de l'impact des structures côtières sur l'évolution du trait de côte ✓ Applicable à grande échelle ou à échelle locale ✓ Prise en compte des apports en sédiments fluviaux, de l'élévation du niveau de la mer... 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nombre de données nécessaires conséquent ✓ Calibration difficile ✓ Transport sédimentaire toujours calculé parallèlement à la côte Modèle non approprié pour certaines géométries de côtes

Illustration 17 – Avantages et limites du modèle Unibest-CL+.

3.2.4. Les modèles basés sur la loi de Brün

La loi de Brün (Brün, 1962) est la méthode la plus appliquée pour estimer l'érosion à long terme des plages, même s'il existe un débat sur la validité du modèle. L'application de cette loi est basée sur l'hypothèse que les plages ont toujours un profil d'équilibre qui s'adapte aux changements du niveau de la mer par translation du profil, sans changement de forme (cf. illustration 18). La formule de Brün prédit le recul du trait de côte, R , selon la formule suivante:

$$R = S * \left[\frac{L}{(B + h)} \right] = S * \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right)$$

Où : S est l'élévation du niveau de la mer ;
 L est la largeur du profil actif ;
 B est la hauteur de la plage émergée ;
 h est la profondeur de fermeture.

Une simplification de la formulation est d'écrire la loi de Brün comme le produit de l'élévation du niveau de la mer et une estimation de la pente de côte ($\tan \alpha$) entre la berme et la profondeur de fermeture.

Les conditions d'application du principe sont strictes. D'une part, la plage doit être en état d'équilibre dynamique, ce qui suppose que son profil moyen reste le même d'une année sur l'autre. D'autre part, son budget sédimentaire doit être en équilibre à savoir que le volume global des pertes doit être équivalent au volume global des apports.

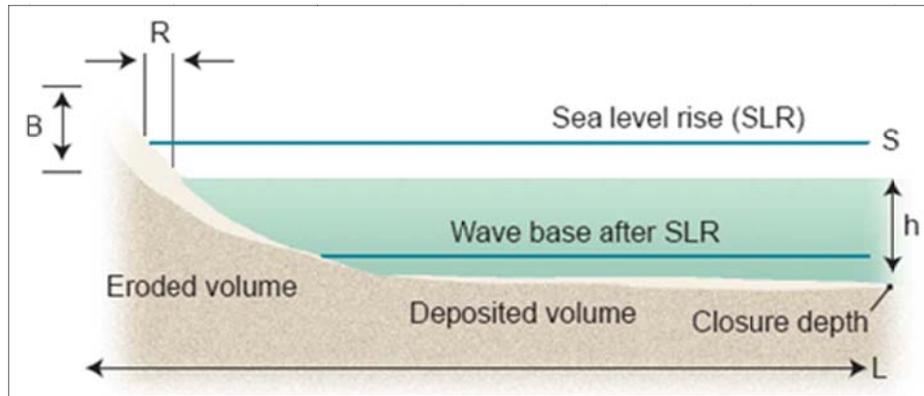


Illustration 18 – Principe de la loi de Brüun (Yates Michelin et al., 2010).

Avantages

La loi de Brüun est appliquée facilement aux grandes échelles spatiales dues au nombre limité des variables requises. La formule est simple à appliquer et les résultats pourraient fournir la première étape d'une analyse aux impacts de l'élévation du niveau marin.

Limites

Cette méthode possède de nombreuses limites notamment à cause de ses hypothèses de base. En effet, le principe ne tient compte que de l'élévation du niveau marin et néglige les aspects hydrodynamique et granulométrique. De plus, cette augmentation du niveau de la mer cause toujours un recul du profil de plage, ce qui n'est pas toujours le cas. Enfin, ce recul du trait de côte est supposé linéaire or, cette évolution se fait par à-coups.

Selon Durand (1999), cette méthode repose sur deux paramètres aléatoires, à savoir la profondeur de fermeture (h) et la largeur de la zone de surf (L), paramètre qui dépend du premier. Elle suppose qu'il ne peut y avoir de perte au large ce qui est faux. De plus, le temps de réponse de la plage à l'élévation du niveau de la mer est décalé dans le temps par rapport à cette élévation.

Le principe suppose un budget sédimentaire à l'équilibre et ne prend pas en compte l'effet de la dérive littorale, ce qui limite l'utilisation de cette méthode.

Cette méthode a pu être testée sur le littoral du Languedoc-Roussillon entre La Grande-Motte et Frontignan (Yates Michelin et al., 2010) (cf. illustration 19).



Illustration 19 – Exemple d’application de la loi de Brüun à Carnon plage avec 4 scénarios différents de l’élévation du niveau marin (Yates Michelin et al., 2010).

Les avantages et limites de la loi de Brüun sont synthétisés sur l’illustration 20.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ S, élévation du niveau de la mer ✓ L, largeur du profil actif ✓ B, hauteur de la plage émergée ✓ h, profondeur de fermeture 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Applicable facilement aux grandes échelles spatiales ✓ Nombre limité de valeurs requises ✓ Formule simple à appliquer ✓ Prise en compte de l’impact de l’élévation du niveau marin 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Néglige les aspects hydrodynamique et granulométrique ✓ Calcul systématique d’un recul du profil de plage ✓ Recul du trait de côte supposé linéaire ✓ Repose sur deux paramètres aléatoires: la profondeur de fermeture et la largeur de la zone de surf ✓ Suppose un budget sédimentaire à l’équilibre ✓ Ne s’applique que sur des sites très restreints

Illustration 20 – Avantages et limites de la loi de Brüun.

La présentation de la loi de Brüun permet de s’apercevoir que ce principe est très limité. Elle ne peut s’appliquer que sur des sites très restreints, c’est pourquoi certains chercheurs ont essayé d’adapter cette loi à différents sites d’études en la modifiant.

a. La méthode de Kriebel et Dean (1985)

Cette méthode est présentée dans la thèse de Paul Durand (1999). Celle-ci cherche à étendre le champ d'application du principe de Brüun aux plages dont le budget sédimentaire n'est pas en équilibre avec la formule suivante :

$$R = S * (L/h + B) + \left[\frac{(Q * p/100)}{(h + B)} \right]$$

Où : R = recul du trait de côte;
S = élévation du niveau marin;
L = longueur du profil actif ;
h = profondeur de fermeture ;
B = hauteur de la plage émergée, y compris l'avant dune ;
Q = gain ou pertes de sédiments m³ le long du profil actif pour une période de temps donnée ;
p = pourcentage de matériel sableux.

Avantages

Elle peut être appliquée à un grand nombre de littoraux puisqu'elle intègre les effets du transport longitudinal, responsable du budget sédimentaire.

Limites

A partir du moment où la règle de Brüun a été élaborée pour des plages à budget sédimentaire équilibré, il paraît mal venu d'y rajouter un paramètre sur le transit sédimentaire. Rien ne dit qu'une plage dont le bilan est déséquilibré, réponde à l'élévation du niveau marin en suivant la loi de Brüun.

Un problème se pose avec la détermination du paramètre Q. Le degré de précision avec lequel est calculé ce paramètre va influencer sur la qualité des prévisions. Or, seul l'analyse de profils topo-bathymétriques permet d'évaluer avec précision des volumes érodés ou accumulés sur la totalité du profil actif d'une plage. De plus, il est indispensable que les profils couvrent un laps de temps important pour minimiser l'influence des variations saisonnières sur le profil de plage.

L'ensemble des avantages et limites de la méthode de Kriebel et Dean est résumé dans le tableau de l'illustration 21.

Données de base	Avantages	Limites
✓ R, recul du trait de côte ✓ S, élévation du niveau marin ✓ L, longueur du profil actif ✓ h, profondeur de fermeture ✓ B, hauteur de la plage émergée, y compris l'avant dune ✓ Q, gains ou pertes de sédiments m ³ le long du profil actif pour une période de temps donnée ✓ p, pourcentage de matériel sableux	✓ S'applique à un grand nombre de littoraux puisqu'elle intègre les effets du transport longitudinal, responsable du budget sédimentaire	✓ Rien ne dit qu'une plage dont le bilan est déséquilibré, réponde à l'élévation du niveau marin en suivant la loi de Brünun ✓ Détermination de la précision du paramètre Q

Illustration 21 – Avantages et limites de la méthode de Kriebel et Dean.

b. La méthode généralisée de Dean et Mauremeyer (1983)

Cette méthode, présentée dans la thèse de Durand (1999), essaie de généraliser la loi de Brünun aux littoraux possédant une barrière sableuse et une lagune selon l'équation suivante:

$$R = \frac{[S * (L_* + W_*)]}{(h_* - h_l)}$$

Où : R = recul du trait de côte;
 S = élévation du niveau marin;
 L* = longueur du profil actif ;
 W* = largeur de l'arrière-dune ;
 h* = hauteur du profil actif depuis le sommet de la plage émergée jusqu'à la profondeur de fermeture ;
 hl = hauteur du cordon dunaire.

Les paramètres utilisés dans cette équation sont présentés sur l'illustration 22.

Les avantages et limites de la méthode généralisée de Dean et Mauremeyer sont présentés dans le tableau de l'illustration 23.

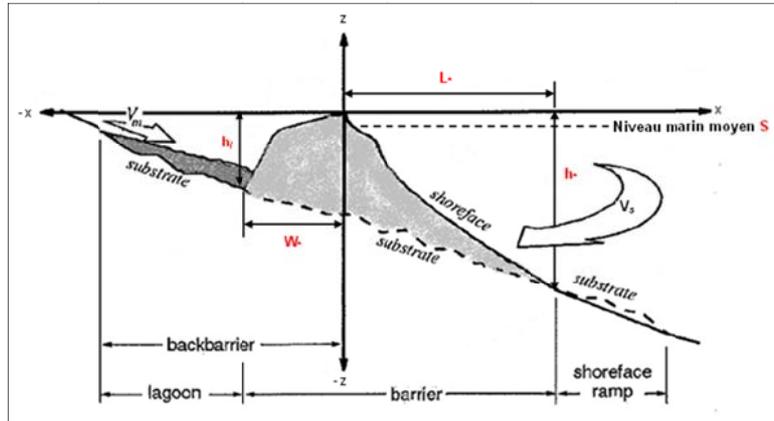


Illustration 22 – Paramètres utilisés dans la loi généralisée de Brün (modifié d'après Cowell et al., 2006).

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ R, recul du trait de côte ✓ S, élévation du niveau marin ✓ L, longueur du profil actif ✓ W, largeur de l'arrière dune ✓ h, hauteur du profil actif depuis le sommet de la plage émergée jusqu'à la profondeur de fermeture ✓ hl, hauteur du cordon dunaire 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Applicable à de nombreux sites puisqu'elle permet de prendre en compte la présence d'un cordon dunaire et d'une lagune 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reprend les limites de la loi de Brün en y ajoutant des incertitudes sur la mesure de hl et W.

Illustration 23 – Avantages et limites de la méthode généralisée de Dean et Mauremeyer.

c. La méthode de Mehta et al. (1991)

Cette méthode, présentée dans la thèse de Paul Durand (1999) utilise le principe de Brün en y ajoutant un paramètre de correction, appelé « facteur de déviation spécifique au site ». Cette variable représente l'ensemble des facteurs autres que l'élévation du niveau marin qui entrent en jeu dans l'évolution du littoral. La démarche se déroule en deux étapes :

- Calcul de la part de l'élévation du niveau marin dans l'évolution passée du trait de côte en appliquant la formule suivante :

$$R_x = \left[S_x * \left(\frac{L}{H} + B \right) \right] + G$$

Où : pour un nombre d'années x , l'évolution du trait de côte R_x en un point précis, est, selon la règle de Brüun, en relation directe avec l'élévation du niveau marin S_x et le facteur de déviation spécifique au site G ; ce facteur est lié empiriquement à tous les autres facteurs qui interviennent.

- Calcul de l'évolution future. Pour un taux d'élévation S_y différent dans le futur, Mehta *et al.* supposent que le facteur spécifique G restera inchangé ; la nouvelle valeur d'évolution R_y sera alors égale à :

$$R_y = R_x + (S_y - S_x) * \left(\frac{L}{H} + B \right)$$

L'ensemble des avantages et limites de la méthode de Mehta *et al.* est présenté dans le tableau de l'illustration 24.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ R, recul du trait de côte ✓ S, élévation du niveau marin ✓ L, longueur du profil actif ✓ h, profondeur de fermeture ✓ B, hauteur de la plage émergée, y compris l'avant dune ✓ G, facteur de déviation spécifique 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Avec l'association du facteur spécifique G dans la formule de Brüun, cette méthode combine une approche de type historique, similaire à la méthode des points extrêmes (cf. partie 5.1.3) ✓ Prise en compte du rôle de l'élévation du niveau marin 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reprend les limites de la loi de Brüun ✓ Reprend les limites de la méthode des points extrêmes

Illustration 24 – Avantages et limites de la méthode de Mehta *et al.*

d. La loi de Brüun couplée au recul historique

Dans le travail du projet EUROSION (2004), une méthode d'extrapolation des tendances historiques avec un ajustement pour tenir compte de l'accélération de l'élévation du niveau marin est recommandée. Cette méthode est essentiellement la combinaison des deux méthodes précédentes : extrapolation des tendances historiques et l'application ($R_{historique}$) de la loi de Brüun utilisant l'augmentation du taux de l'élévation du niveau marin ($S_{futur} - S_{historique}$):

$$R_{futur} = R_{historique} + (S_{futur} - S_{historique}) * \frac{L_*}{(B + h_*)}$$

Où : L est la largeur du profil actif ;
 h_* est la profondeur de fermeture ;

Le projet EUROSION a proposé cette formule pour incorporer les effets de l'élévation du niveau marin (la loi de Brüun) et des stocks sédimentaires (implicites dans le taux historique).

Les avantages et limites de la loi de Brüun couplée au recul historique sont présentés dans le tableau de l'illustration 25.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ R, recul du trait de côte ✓ S, élévation du niveau marin ✓ L, longueur du profil actif ✓ h, profondeur de fermeture ✓ B, hauteur de la plage émergée, y compris l'avant dune ✓ Positions anciennes du trait de côte 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tient compte de plusieurs processus importants grâce à la combinaison des tendances historiques et de l'impact d'un changement des forçages ✓ Adaptée pour l'estimation de l'évolution à long terme du trait de côte aux échelles locales ✓ Tient compte de la variabilité spatiale 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nécessite de nombreuses données de base ✓ Incertitude sur la validité de l'utilisation de cette formule simple

Illustration 25 – Avantages et inconvénients de la loi de Brüun couplée au recul historique.

3.2.5. Les modèles de prédiction à l'échelle des temps géologiques

Ces modèles de prédiction à l'échelle géologique ont été utilisés dans le projet PACE (Prediction of Aggregated Scale Modelling for Coastal Evolution). Ce projet regroupe un ensemble de chercheurs qui développent une vision commune sur le concept en cascade (cf. illustration 26).

Dans ce projet, les chercheurs ont introduit le terme de « Coastal Tract » qui désigne l'ensemble des unités morphologiques de la marge continentale, dépendantes les unes des autres (cf. illustration 27) afin de prendre en compte les processus sédimentaires qui ont lieu sur l'ensemble du littoral et pas uniquement sur la plage ou la côte. Ainsi, ils définissent les processus responsables des changements de la morphologie de la marge continentale.

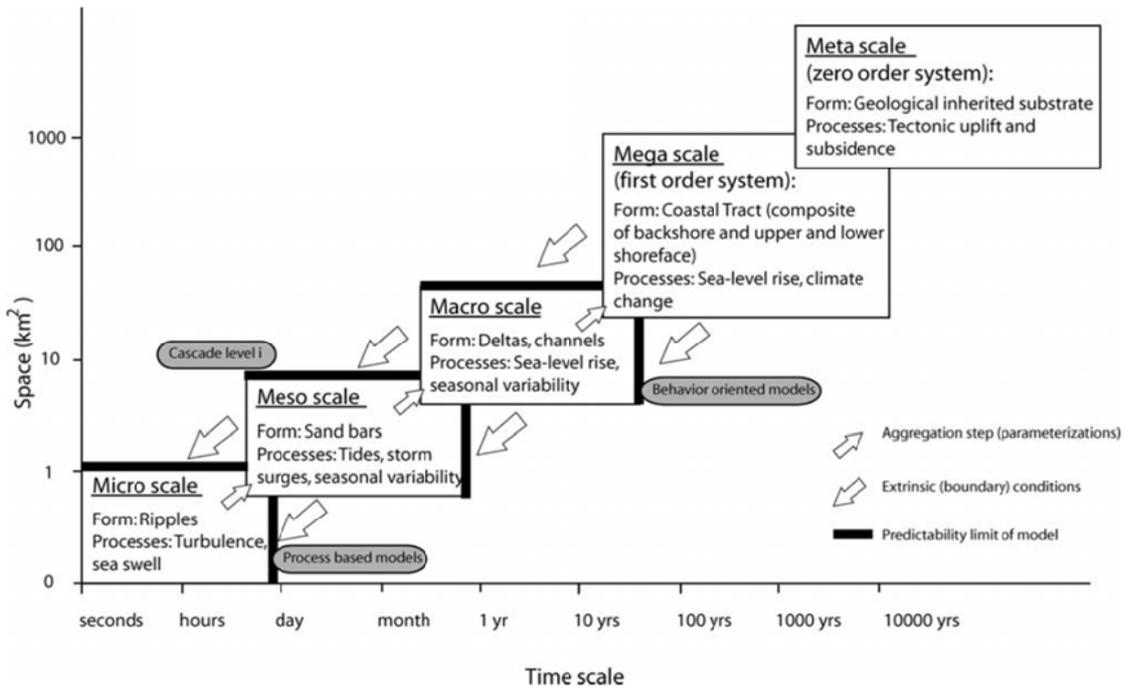


Illustration 26 – Schéma du Concept en Cascade de Cowell et al. (2003).

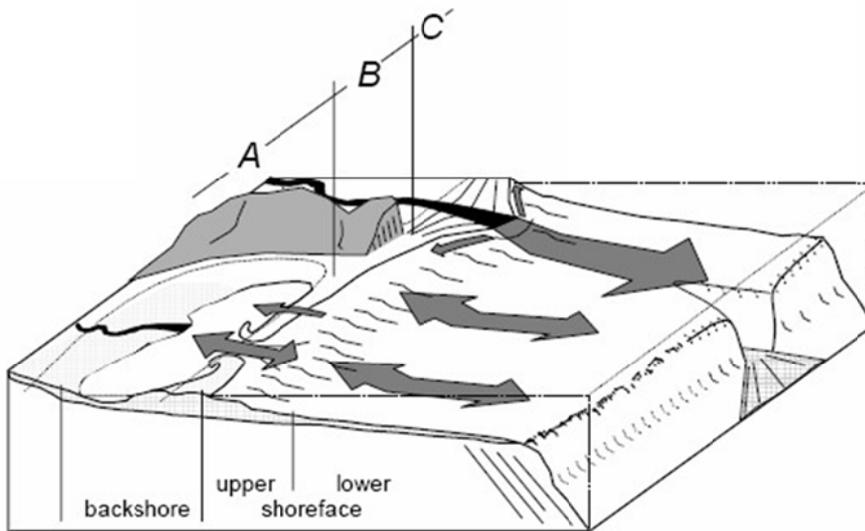


Illustration 27 – Schéma des différentes morphologies comprises dans le « Coastal Tract » (Cowell et al., 2003).

Pour reconstituer l'évolution de la marge continentale, le projet PACE se base sur 4 modèles principaux (cf. illustration 28):

	Model Name	Type	Reference
ADM	Advection-Diffusion Model	CP model with 1DV macroscopic sediment dynamics	Niedoroda <i>et al.</i> (1995)
HPM	Hinged Panel Model	CP model with 1DV input-filtered sediment dynamics	Stive and De Vriend (1995)
STM	Shoreface Translation Model	CP model of morphokinematics	Cowell <i>et al.</i> (1995)
ASMITA	Aggregated Scale Morphological Interaction between a Tidal-inlet system and the Adjacent coast	Box model with spatially lumped, macroscopic sediment dynamics	Buijsman (1997) Stive <i>et al.</i> (1998)

Illustration 28 – Modèles utilisés dans le projet PACE (CP= Cross-shore Profile DV dimensionnal Vertical representation of depth integrated sediment dynamics).

Ces modèles se basent en partie ou entièrement sur les variables dites de Sloss :

- l'espace d'accommodation disponible pour le dépôt (changement du niveau marin) ;
- la ressource en sédiment (le taux et la composition dépend du type de source) ;
- l'intensité du transport sédimentaire (mécanisme de dispersion du sédiment).

ADM en utilise une partie sauf pour l'intensité du transport où il utilise un modèle d'advection/diffusion du sédiment. Le modèle ADM peut être utilisé pour simuler l'évolution de la géométrie de la « lower shoreface ».

HPM incorpore toutes les variables de Sloss présentées ci-dessus.

STM modélise l'évolution du trait de côte suivant le principe de la loi de Brün généralisée mais prend en compte : un budget sédimentaire ouvert, la résistance du substrat et la géométrie détaillée de l'avant-côte. Ce modèle a été utilisé par Cowell *et al.* (1995) pour étudier la Baie de Tuncurry en Australie.

ASMITA quant à lui peut déterminer le volume de sable transitant de l'avant-côte vers les lagunes.

Ces différents modèles ont été appliqués dans différentes régions (cf. illustration 29).

Data Set	Comparative Properties	Summary Reference
Netherlands: Haarlem, Central Holland	Closed barrier (inlet-free) coast with low-gradient shelf and low (-ve) sediment input	BEETS, <i>et al.</i> , 1992; STIVE and DE VRIEND, 1975
Netherlands: Terschelling, Wadden Friesland	Barrier-inlet tidal basin coast with lo-gradient shelf and low (+ve) sediment input	SHA, 1992; VAN DER SPEK, 1994
SE Australia: Tuncurry Bay	Closed barrier (inlet-free) coast with steep shelf and low (+ve) sediment input	ROY <i>et al.</i> , 1994, 1997
NW USA: Columbia River coastal cell (Tillamook Head to Point Grenville)	Mixed closed and barrier-inlet coast with steep shelf and moderate (+ve) sediment input	STERNBERG, 1986; PETERSON and PHIPPS, 1992; WOLF <i>et al.</i> , 1997; KAMINSKY <i>et al.</i> , 1997
E. USA: Duck NC	Mixed closed and barrier-inlet coast with steep shelf and sediment input during post glacial transgression	FIELD <i>et al.</i> , 1979; MEISBURGER <i>et al.</i> , 1989

*Illustration 29 – Tableau des différents sites où ont été appliqués les modèles (source : Cowell *et al.* 2003).*

4. Présentation des modèles statistiques

Ce type de modèles est basé sur les données de terrains et nécessite des séries temporelles et spatiales sur de longs intervalles de temps. Deux grands types de modèles statistiques existent. L'une de ces méthodes est basée sur l'étude du recul historique du trait de côte, l'autre est contrôlée par les séries temporelles de données bathymétriques.

4.1. LES MODELES BASES SUR LES TENDANCES HISTORIQUES

Dans les régions pour lesquelles des observations du mouvement historique de trait de côte existent, Pilkey et Cooper (2004) ont suggéré qu'il était préférable d'abandonner la loi de Brünun et d'estimer l'évolution long terme du rivage avec une extrapolation des tendances historiques ($R_{\text{futur}} = R_{\text{historique}}$). Les tendances historiques sont estimées avec des observations du trait de côte (photographies aériennes, levés GPS, levés Lidar). La robustesse de l'estimation dépend donc de la quantité et de la qualité des données disponibles.

Quatre grands types de méthodes utilisent la tendance historique :

- la méthode de régression linéaire ;
- la méthode de Fenster & al (1993) ;
- la méthode des points extrêmes (End Point Rate) ;
- la méthode de la moyenne des taux (Average Of Rate « AOR »).

4.1.1. La méthode de régression linéaire

Cette méthode est décrite dans la thèse de Paul Durand (1999). Elle se base sur le positionnement du trait de côte historique afin d'obtenir la position du trait de côte futur. Ainsi, les différentes positions du trait de côte historique sont placées dans un graphique. Puis, à l'aide des points historiques une droite de régression linéaire est tracée permettant d'obtenir par extrapolation la position du trait de côte futur (cf. illustration 30).

Dans cette méthode, il est nécessaire de travailler à partir de données remontant le plus loin possible dans le temps de manière à réduire l'influence des variations à court terme de la position du trait de côte dans le calcul de la tendance. L'idéal selon Crowell *et al.* (1997) et Douglas *et al.* (1998) est de recourir à des données couvrant un intervalle de temps au moins deux fois supérieur à la durée de la prévision. Par ailleurs, les données exceptionnelles (années de forte tempête et crues) ne doivent pas être prises en compte.

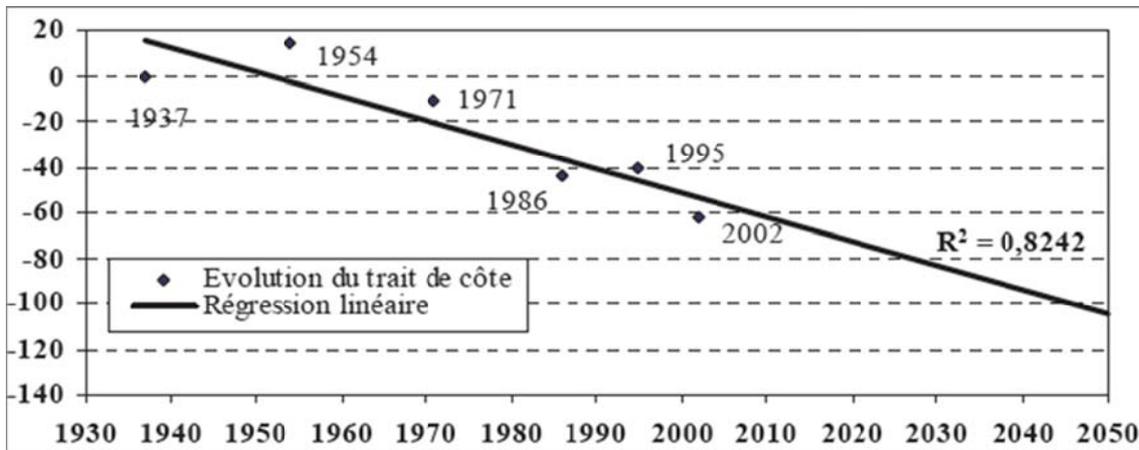


Illustration 30 – Présentation de la méthode de régression linéaire (Durand et Heurtefeux, 2006).

Avantages

Cette méthode tient compte de tous les processus qui affectent le mouvement du trait de côte actuel. L'influence de la géologie, de la géomorphologie locale, du climat de vagues, de l'élévation du niveau marin actuel, du bilan sédimentaire et d'autres forçages importants sont donc implicitement intégrés dans les tendances historiques mesurées. L'application de cette méthode permet une évaluation à l'échelle locale, dépendant des observations disponibles. De plus, selon Durand (1999), elle présente un triple avantage. Elle permet tout d'abord de calculer une tendance en prenant en compte toutes les données de position du trait de côte disponibles. Par ailleurs, elle est facile à mettre en œuvre. Enfin, plusieurs techniques (calcul des coefficients de corrélation et de détermination, examen de la distribution des résidus, c'est à dire des écarts au modèle) permettent de tester la qualité de l'ajustement linéaire et d'estimer une marge d'incertitude par le biais d'un intervalle de confiance.

Limites

Alors que l'extrapolation des tendances historiques tient compte des processus locaux importants, un inconvénient majeur demeure. La forte hypothèse implicite est que les événements et les tendances historiques observés sont représentatifs de l'avenir. De plus, cette méthode a besoin de beaucoup de données aux échelles spatiales et temporelles pour tenir compte des variations spatiales et d'avoir des estimations robustes des tendances long terme (exemples : sans biais saisonniers, annuels, interannuels, etc.). Selon Durand (1999), l'utilisation de cette méthode pose un double problème. D'une part, elle consiste à traiter de manière statistique, en tant que chronique temporelle organisée, des données peu nombreuses. En outre, ces valeurs sont parfois réparties de manière irrégulière dans le temps, ce qui confère aux données isolées un poids plus important dans le calcul de la tendance évolutive à long terme. D'autre part, le fait d'ajuster des valeurs d'évolution du trait de côte à une droite de régression revient à considérer que l'évolution d'un rivage se résume à une

tendance linéaire avec des résidus distribués de manière gaussienne, c'est-à-dire comportant peu de valeurs extrêmes ce qui est rarement le cas.

Les avantages et limites de la méthode de régression linéaire sont résumés dans le tableau de l'illustration 31.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Observations du trait de côte ✓ Photographies aériennes ✓ Levés GPS ✓ Levés Lidar 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Intégration dans les tendances historiques mesurées de l'influence de la géologie, de la géomorphologie locale, du climat de vagues, de l'élévation du niveau marin actuel, du bilan sédimentaire et d'autres forçages importants ✓ Facile à mettre en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hypothèse que les tendances historiques observées sont représentatives de l'avenir ✓ Nécessite de nombreuses données spatiales et temporelles ✓ Données réparties de manière irrégulière dans le temps, ce qui confère aux données isolées un poids plus important dans le calcul de la tendance évolutive à long terme
<p><u>Données additionnelles:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Dates et volumes des rechargements de plage ✓ Informations sur les tempêtes ✓ Inventaire des ouvrages de protection 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacité d'estimer une marge d'incertitude par le biais d'un intervalle de confiance 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ajustement des valeurs d'évolution du trait de côte à une droite de régression linéaire

Illustration 31 – Avantages et limites de la méthode de régression linéaire.

4.1.2. La méthode de Fenster *et al.* (1993)

Ce modèle est décrit dans la thèse de Paul Durand (1999). Cette méthode est une variante de la méthode précédente, à une étape intermédiaire près qui fait appel à des modèles de régression linéaire et polynomiale.

Dans un premier temps, elle suppose de déterminer la régression qui convient le mieux au site. Pour un site qui est exposé à deux tendances évolutives différentes dans le laps de temps de l'étude, l'application d'une régression polynomiale est nécessaire.

Cette régression polynomiale permet d'obtenir un point critique à partir duquel les données vont être prises en compte. L'utilisation de ces données va permettre de tracer une régression linéaire qui sera utilisée pour prédire l'évolution future du trait de côte (cf. illustration 32).

Les principaux avantages et limites de la méthode de Fenster *et al.* (1993) sont présentés sur le tableau de l'illustration 33.

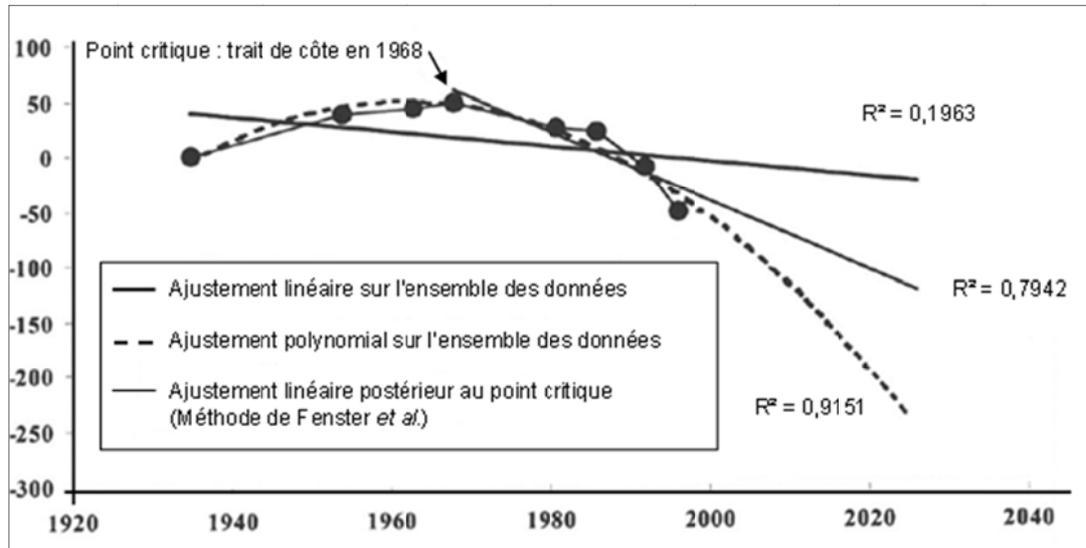


Illustration 32 – Présentation de la méthode de Fenster et al.(1993).

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Observations du trait de côte ✓ Photographies aériennes ✓ Levés GPS ✓ Levés Lidar <p><u>Données additionnelles:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Dates et volumes des rechargements de plage ✓ Informations sur les tempêtes ✓ Inventaire des ouvrages de protection 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permet d'adapter la méthode de régression linéaire à un grand nombre de littoraux 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Calcul sur des échantillons de données très réduits et couvrant un intervalle de temps limité ✓ Risque d'enregistrer des évolutions à court terme qui ne correspondent pas forcément à la tendance évolutive à long terme ✓ Implique de déterminer préalablement si les ruptures dans l'évolution passée du trait de côte correspondent réellement à des renversements durables de la tendance évolutive

Illustration 33 – Avantages et limites de la méthode de Fenster et al.(1993).

4.1.3. La méthode des points extrêmes (Himmelstoss, 2009)

Cette méthode mathématique appelée EPR (End Point Rate) par les chercheurs anglo-saxons est la plus simple de toutes. Elle consiste simplement à calculer un taux d'érosion moyen à partir de la position du trait de côte au début et à la fin de la période d'étude et à extrapoler ce taux dans le futur (cf. illustration 34). Seule deux valeurs sont nécessaires ce qui confère à cette méthode son principal avantage mais également son principal inconvénient. En effet, les éventuels changements dans la tendance évolutive au cours de la période d'étude ne sont pas détectables, et par conséquent, il n'est pas possible d'en tenir compte lors de l'extrapolation.

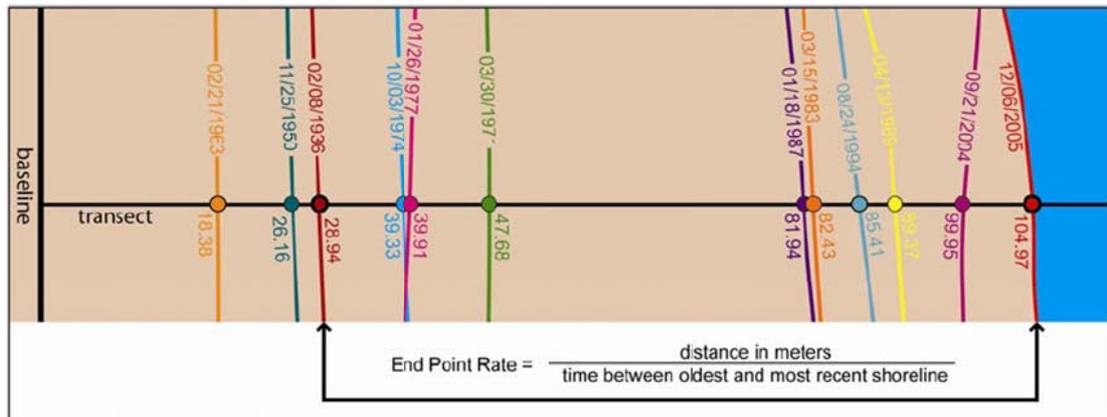


Illustration 34 – Illustration du principe de la méthode des points extrêmes (Himmelstoss, 2009).

Les avantages et inconvénients de la méthode des points extrêmes sont présentés sur l’illustration 35.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Observations du trait de côte ✓ Photographies aériennes ✓ Levés GPS ✓ Levés Lidar <p><u>Données additionnelles:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Dates et volumes des rechargements de plage ✓ Informations sur les tempêtes ✓ Inventaire des ouvrages de protection 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prise en compte uniquement de deux valeurs. Ne nécessite donc pas beaucoup de données 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prise en compte uniquement de deux valeurs. Les éventuels changements dans la tendance évolutive au cours de la période d’étude ne sont pas détectables. ✓ Incertitude sur le taux d’érosion calculé en fonction des jeux de données choisis. ✓ Nécessite de choisir des dates qui sont éloignées d’évènements exceptionnels

Illustration 35 – Avantages et limites de la méthode des points extrêmes.

4.1.4. La méthode de la moyenne des taux (AOR Average Of Rate)

Cette méthode a été mise au point par Foster et Savage (1989) pour évaluer le taux d’érosion le long des rivages de la Floride. Elle est utilisée lorsque l’on connaît les positions du trait de côte dans le passé pour plus de deux dates. Le principe consiste alors à calculer les taux moyens annuels d’érosion entre chacune des dates disponibles et à faire la moyenne entre tous les taux obtenus (cf. illustration 36).

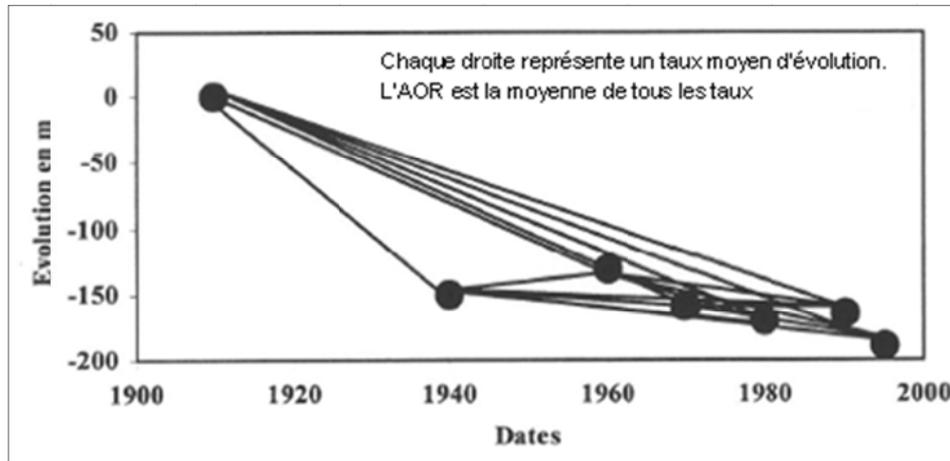


Illustration 36 – Illustration du mode de calcul de l'AOR (source : Dolan et al. 1991).

Toutefois, seuls les taux moyens supérieurs, en valeur absolue, à un critère de temps minimal sont utilisés pour ce calcul :

$$T_{min} = \frac{\left(\sqrt{(E_1^2 + E_2^2)} \right)}{R_1}$$

Où : E_1 = erreur dans la détermination du premier point ;
 E_2 = erreur dans la détermination du second point ;
 R_1 = taux moyen d'évolution sur la période considérée.

Par exemple, avec une précision de +/- 6 mètres pour chaque mesure et une évolution de -30 mètres en 10 ans, le critère T_{min} sera de -2,83 mètres $((6^2 + 6^2)^{0,5} / -3)$; le taux moyen égal à -3 mètres par an sera alors pris en compte dans le calcul de l'A.O.R, car supérieur (en valeur absolue) au critère T_{min} .

Foster et Savage recommandent l'application de l'A.O.R sur des rivages où la tendance évolutive est clairement marquée et où les fluctuations de la position du trait de côte ne sont pas trop importantes.

Les avantages et limites de la méthode de la moyenne des taux sont présentés dans le tableau de l'illustration 37.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Observations du trait de côte ✓ Photographies aériennes ✓ Levés GPS ✓ Levés Lidar <p><u>Données additionnelles:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Dates et volumes des rechargements de plage ✓ Informations sur les tempêtes ✓ Inventaire des ouvrages de protection 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alternative plus précise à la méthode des points extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revient à donner plus de poids aux taux d'évolution calculés sur de courtes périodes ✓ Incertitude dans le mode de détermination du critère de temps minimal. Il aurait été plus significatif de prendre en compte uniquement la marge d'erreur maximale

Illustration 37 – Avantages et limites de la méthode de la moyenne des taux (AOR).

4.2. LES MODELES BASES SUR DES FONCTIONS MATHÉMATIQUES

Ces modèles visent à établir un modèle mathématique à partir de données de terrain. Les modèles qui vont être exposés par la suite sont basés sur des données bathymétriques temporelles et spatiales à partir desquelles l'information dynamique peut être extraite. Ils sont présentés par Larson *et al.* (2003).

4.2.1. Modèles statistiques

Les modèles mathématiques les plus simples et les plus couramment utilisés sont les statistiques telles que : les moyennes, les écart-types, les classes, les corrélations ou encore la méthode de Fourier.

a. L'écart-type

En mathématiques, plus précisément en statistiques et probabilités, l'écart type mesure la dispersion d'une série de valeurs autour de leur moyenne.

Grâce au calcul de l'écart-type de l'élévation du profil moyen mesuré sur plusieurs années, il est par exemple possible de déterminer la profondeur de fermeture. Rappelons que la profondeur de fermeture est la profondeur limite au-delà de laquelle la plage sous-marine n'enregistre plus de changements significatifs dans sa morphologie. L'illustration 38 montre les résultats obtenus pour 4 profils topobathymétriques à Duck (Caroline du Nord) sur 13 ans de données. On peut observer une nette augmentation de l'écart-type (standard deviation in elevation) pour les quatre profils étudiés au niveau de la profondeur -4m. Cette évolution caractérise ainsi la profondeur de fermeture qui permettra par la suite d'appliquer des lois de l'évolution long-terme de la côte telle que la loi de Brünun et ses adaptations.

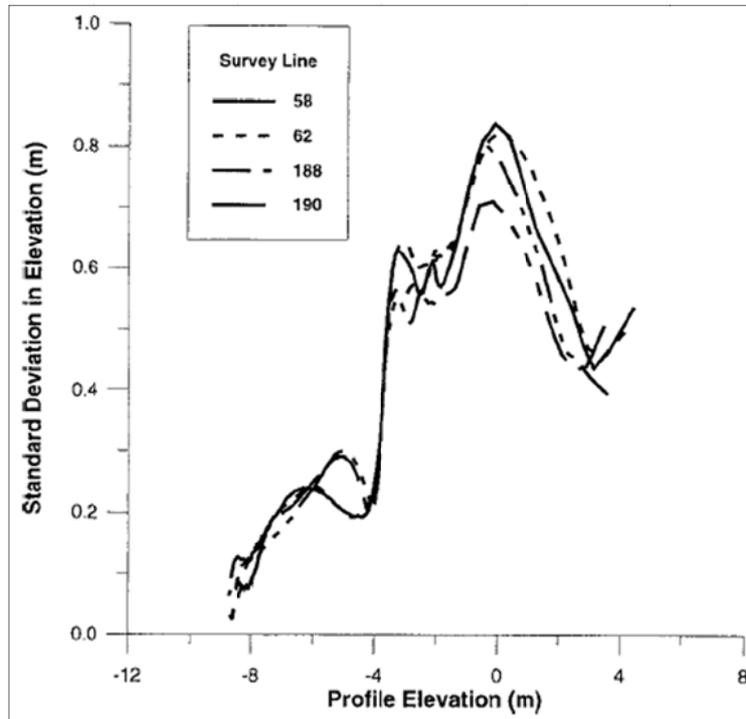


Illustration 38 – L'écart-type en élévation en fonction du profil d'élévation moyen pour 4 profils différents (Larson et al, 2003).

b. L'analyse de corrélation

L'analyse de corrélation fournit une relation linéaire entre deux variables pour lesquelles des mesures simultanées dans le temps sont disponibles. Cette méthode consiste à calculer un coefficient de corrélation linéaire R , compris entre -1 et 1 dans l'optique d'étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre les deux variables. Plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est forte. Par exemple, pour le site de Duck (Caroline du Nord), la corrélation entre le régime des vagues et l'évolution du profil topographique est avérée mais il est difficile d'établir des relations prédictives.

c. La méthode de Fourier

La méthode de Fourier est une analyse spectrale. Elle permet de représenter les formes physiques dans le temps et l'espace à travers des fonctions sinusoïdales. Chaque fonction va représenter un mode (évolution saisonnière, évolution événementielle, évolution long-terme). Cependant, la représentation n'est pas optimale dans le sens où les formes des fonctions appliquées sont fortement dépendantes du jeu de données initial qui doit prendre en compte ces différents modes d'évolution, ce qui est rarement le cas.

d. L'analyse de corrélation canonique

L'analyse de corrélation canonique comporte deux ensembles de variables. Généralement, mais non obligatoirement, un des ensembles est constitué de variables dites « indépendantes » ou « prévisionnelles » (X) et l'autre ensemble est constitué de variables dites « dépendantes » ou « expliquées » (Y).

Cette analyse permet d'étudier la corrélation entre les deux ensembles de variables initiales et permet d'extraire de ces ensembles, des variables canoniques telles que ces dernières soient les plus corrélées possibles et orthogonales entre elles. L'algorithme qui est utilisé dans ce genre d'analyse fait en sorte de maximiser la corrélation entre les deux ensembles de variables et, pour ce faire, une procédure itérative est utilisée dans le but de trouver la pondération optimale des variables en provenance de chacun des deux ensembles.

Cette méthode est rarement utilisée dans l'étude de l'évolution de la morphologie de la côte. Toutefois, des applications d'analyse de corrélation canonique ont eu lieu à Duck (Caroline du Nord) en 2003. Larson *et al.* ont voulu tester le caractère prédictif de l'analyse canonique en l'appliquant à un ensemble de données concernant les profils topo-bathymétriques de plage et les caractéristiques des vagues. L'objectif était d'étudier la possibilité de prévoir l'évolution des profils avec les données du taux de déferlement des vagues. Il en ressort que le modèle explique relativement bien l'évolution près de la côte, mais au-delà de 400 mètres le caractère prédictif du modèle est plus limité.

4.2.2. La fonction empirique orthogonale (EOF)

Un autre modèle mathématique connu est la fonction empirique orthogonale (EOF). Cette fonction permet d'extraire des variations cohérentes parmi un ensemble de données de base (données bathymétriques, profils topo-bathymétriques sur un laps de temps conséquent) puis de décomposer ce jeu de données en plusieurs groupes de données (modes), dont les variations sont cohérentes entre elles. Un pourcentage de variance est donné à chaque mode (par exemple un mode peut représenter 65% de la variance du jeu de données de base). Ces modes permettent ensuite d'étudier l'évolution spatiale et temporelle de la côte. On obtient donc des modes de données temporelles et spatiales qui permettent de visualiser l'évolution du littoral. En outre, l'EOF permet de suivre les effets des rechargements de plage.

La technique de l'EOF a été appliquée aux Pays-Bas sur les plages de Terschelling sur 31 ans de données (cf. illustration 39). Les modes temporels décrivent la variation de la pente dans le temps par rapport à la pente du profil moyen. Le mode spatial 1 représente les profils bathymétriques moyens le long des 25 km de côte étudiés sur les 31 ans de données. Le mode spatial 2 ainsi que le mode spatial 3 représentent en gris clair les différentes positions d'une même barre sableuse près de la côte. Ils permettent ainsi de décrire les mouvements transversaux de cette barre au cours des 31 ans d'étude.

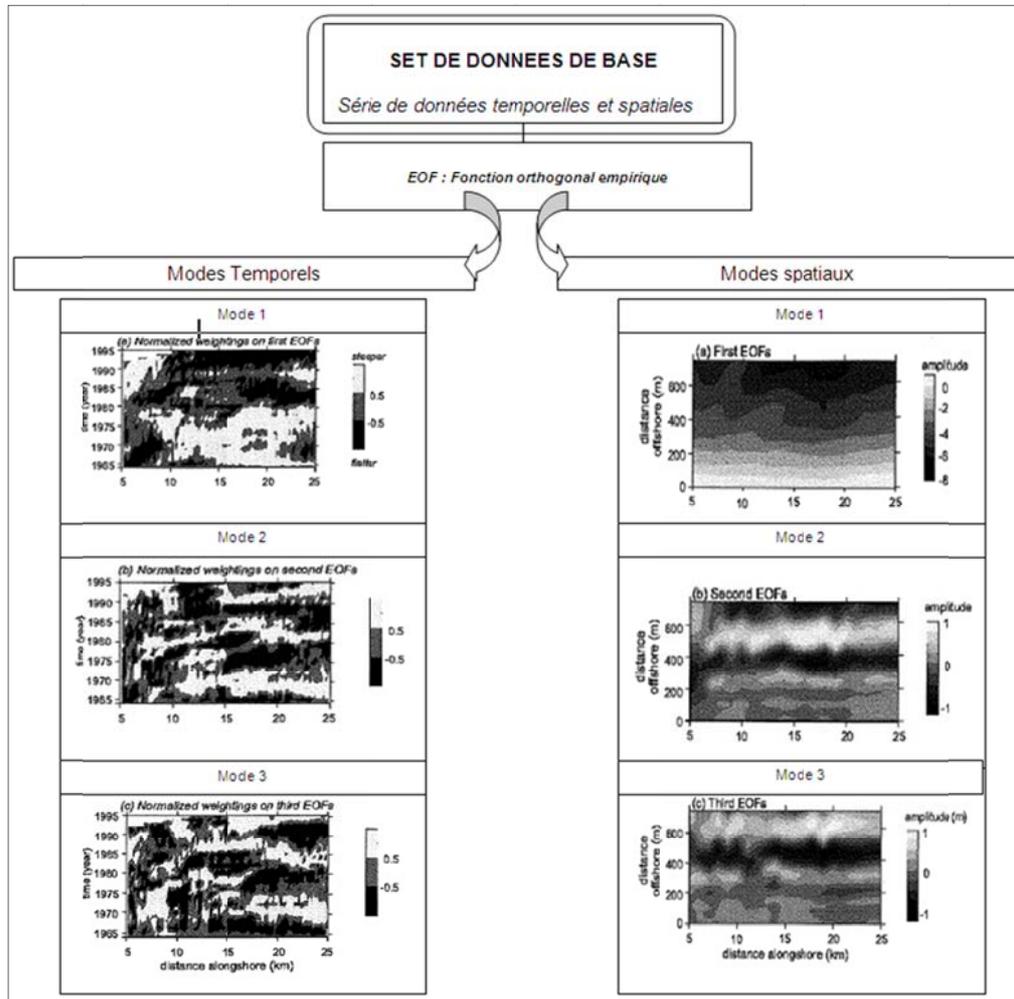


Illustration 39 – Principe des Fonctions EOF pour les plages de Terschelling (Larson et al, 2003).

Les avantages et inconvénients des méthodes basées sur les fonctions mathématiques sont exposés dans l'illustration 40.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Données bathymétriques ✓ Profils topo-bathymétriques sur un laps de temps conséquent ✓ Données de vagues 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ne coûte pas cher en temps de calcul ✓ Méthodes basées uniquement sur des données de terrain; la connaissance de toute la complexité des processus physiques de la dynamique côtière n'est donc pas nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Beaucoup de données sont nécessaires sur une échelle de temps conséquente ✓ La représentativité et la précision des données

Illustration 40 – Avantages et Inconvénients des modèles basés sur les fonctions mathématiques.

5. Présentation des méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives contrairement aux méthodes quantitatives citées précédemment, ne nécessitent aucun calcul. Elles se basent sur la connaissance du système côtier et des changements climatiques. A partir de ces éléments, une estimation qualitative de l'évolution de la côte peut être faite, à « dire d'expert ». D'autres méthodes encore plus qualitatives consistent à définir arbitrairement une zone tampon près de la côte. Ces deux méthodes sont étudiées ci-dessous.

5.1. L'AVIS D'EXPERT

Le dire d'expert (ou expertise) correspond à une interprétation naturaliste qui se base sur les retours d'expérience acquis dans diverses situations comparables. Hinton *et al.* (2007) ont suggéré que l'état actuel de la modélisation est limité aux échelles long terme et un manque de données ne permet pas la validation de cette méthode. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser l'avis d'experts. Pour ce type d'analyses les données requises sont souvent plus qualitatives que quantitatives. Pour mettre en œuvre ce projet, il est proposé de rassembler un groupe d'experts, qui examinera toutes les données et prédictions faites avec les autres méthodes pour identifier les zones probablement érodées à l'horizon 2100.

Les avantages et limites de cette méthode sont présentés dans le tableau de l'illustration 41.

Données de base	Avantages	Limites
<u>Observations qualitatives:</u> ✓ Géologie ✓ Géomorphologie ✓ Bilans sédimentaires ✓ Forçages ✓ Erosion ✓ Probabilités de submersion	✓ Peu de données quantitatives sont nécessaires mais connaissance du secteur d'étude	✓ Résultats subjectifs

Illustration 41 – Avantages et limites de l'avis d'expert.

5.2. LA ZONE TAMPON

L'application d'une zone tampon est une alternative simple à l'utilisation d'équations ou de modèles mathématiques pour estimer l'évolution future du trait de côte. Elle consiste à délimiter arbitrairement une zone de largeur fixe à partir du trait de côte. Cette zone comprend en théorie les zones susceptibles d'être érodées à long-terme (cf. illustration 42).



Illustration 42 – Exemple d'application d'une zone tampon de 500 mètres à Narbonne-Plage.

Dans l'étude du groupe Risques Naturels, Assurance et Changement Climatique (RNACC) exposée par Yates Michelin M. *et al.* (2010), l'évolution long terme du trait de côte est estimée avec une zone tampon autour des côtes susceptibles d'être érodées. Sans le recours à des modèles fiables ou des données précises pour estimer l'érosion long terme du rivage, le groupe de travail a sélectionné cette méthode pour deux raisons principales :

- le recul du trait de côte varie significativement localement dépendant de la géologie, la géomorphologie, la bathymétrie et les forçages hydrodynamiques ;
- le manque de données précises de la topographie et bathymétrie.

Une zone tampon de 500 m a été appliquée entre Frontignan et La grande Motte par Yates Michelin M. *et al.* (2010). Cette valeur de 500 m est un compromis qui prend en compte d'une part des reculs qui pourront varier considérablement selon la morphologie de la côte et les forçages hydrodynamiques et d'autre part, la précision des données utilisées pour quantifier l'aléa érosion.

Les avantages et limites de cette méthode sont présentés sur l'illustration 43.

Données de base	Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Définition arbitraire de la largeur de la zone tampon sans données quantitatives de base 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Facilement applicable aux échelles régionales ✓ Couvre une période de temps indéterminée ✓ N'est pas limitée par des hypothèses sur les forçages ✓ Ne nécessite pas de données précises 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Définition arbitraire de la largeur de la zone tampon ✓ N'est pas basée sur des processus physiques ✓ Ne prend pas en compte les variations spatiales de l'évolution du trait de côte

Illustration 43 – Avantages et limites de la zone tampon.

5.3. L'INDICE DE VULNERABILITE COTIERE « COASTAL VULNERABILITY INDEX » (CVI)

L'indice de vulnérabilité côtière est un indice qui caractérise la vulnérabilité aux aléas côtiers tels que l'érosion et la submersion marine liées à l'élévation du niveau marin. Gornitz (1991) a identifié différents paramètres physiques contrôlant la sensibilité de la zone côtière à l'élévation du niveau marin. Le CVI a été étudié sur différentes côtes (Ouest des Etats-Unis, côte du Canada) par Shaw *et al.* en 1998 et prend en compte l'ensemble des paramètres présentés sur l'illustration 44.

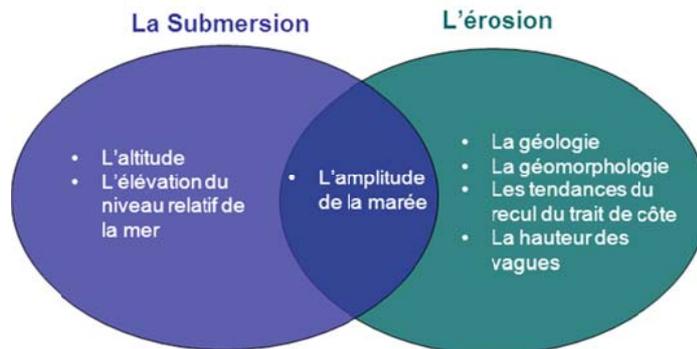


Illustration 44 – Paramètres utilisés par Gornitz (1991) pour caractériser le CVI.

L'importance de chaque paramètre considéré dans l'estimation du CVI est déterminée de manière qualitative (cf. illustration 45).

Variable	Rank				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high risk 5
Relief (m)	≥ 30.1	20.1–30.0	10.1–20.0	5.1–10.0	0–5.0
Rock type (relative resistance to erosion)	Plutonic Volcanic (lava) High-medium grade metamorphics	Low-grade metamor. Sandstone and conglomerate (well-cemented)	Most sedimentary rocks	Coarse and/or poorly-sorted unconsolidated sediments	Fine unconsolidated sediment Volcanic ash
Landform	Rocky, cliffed Coasts Fiords Fiards	Medium cliffs Indented coasts	Low cliffs Glacial drift Salt marsh Coral Reefs Mangrove	Beaches (pebbles) Estuary Lagoon Alluvial plains	Barrier beaches Beaches (sand) Mudflats Deltas
Vertical movement (RSL change) (mm/yr)	≤ -1.1	-1.0–0.99	1.0–2.0	2.1–4.0	≥ 4.1
	Land rising	← within range of eustatic rise →		Land sinking	
Shoreline displacement (m/yr)	≥ 2.1	1.0–2.0	-1.0–+1.0	-1.1– -2.0	≤ -2.0
	Accretion	← Stable →		Erosion	
Tidal range m (mean)	≤ 0.99	1.0–1.9	2.0–4.0	4.1–6.0	≥ 6.1
	Microtidal	← Mesotidal →		Macrotidal	
Wave height, m (max.)	0–2.9	3.0–4.9	5.0–5.9	6.0–6.9	≥ 7.0

Illustration 45 – Niveau d'importance de chaque paramètre inclus dans la calcul du CVI (Gornitz, 1991).

Dans une étude récente, Özyurt *et al.* (2010 a et b) utilisent la méthodologie du CVI en y ajoutant les paramètres liés à l'action humaine ainsi qu'un modèle de hiérarchie analytique. Ils analysent ainsi les indicateurs de vulnérabilité liés aux paramètres physiques et socio-économiques selon :

- l'augmentation de l'érosion de la côte ;
- les inondations ;
- l'augmentation des submersions dues aux surcotes de tempêtes ;
- l'intrusion de sel dans les nappes d'eau et les estuaires.

Le rang d'importance de chaque paramètre qu'il soit physique ou socio-économique est défini de manière qualitative (cf. illustration 46).

		Range				
Parameters		Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very High 5
Rate of SLR	mm/yr	<1	1-2	2-5	5-7	7-9 and over
Geomorphology		Rocky cliffed coasts Fjords	Medium cliffs Indented coasts	Low cliffs Glacial drift Alluvial plains	Cobble beaches Estuary Lagoon	Barrier beach Sand beach Salt marsh Mudflats Deltas Mangrove Coral reefs
Coastal Slope		>1/10	1/10-1/20	1/20-1/30	1/30-1/50	1/50-1/100
Significant Wave Height	m	<0.5	0.50-3.0	3.0-6.0	6.0-8.0	>8.0
Sediment Budget		More than 50% of the shoreline is in accretion	Between 10-30% of the shoreline is in accretion	Less than 10% of the shoreline is in erosion or in accretion	Between 10-30% of the shoreline is in erosion	More than 50% of the shoreline is in erosion
Tidal range	m	>6.0	4.0-6.0	2.0-4.0	0.5-2.0	<0.5
Proximity to Coast	m	>1000	700-1000	400-700	100-400	<100
Type of Aquifer		leaky confined		confined		unconfined
Hydraulic Conductivity	m/day	0-12	12-28	28-41	41-81	>81
Depth to groundwater level above sea	m	>2.00	1.25-2.0	0.75-1.25	0.0-0.75	≤0.00
River Discharge	m ³ /s	>500	250-500	150-250	50-150	0-50
Water Depth at down stream	m	≤1	2	3	4-5	>5

		Range				
Human Parameters		Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very High 5
Reduction of sediment supply		>%80	%60-80	%40-60	%20-40	<%20
River flow regulation		Not affected		Moderate affected		Strongly affected
Engineered frontage		<%5	%5-20	%20-30	%30-50	>%50
Groundwater consumption		<%20	%20-30	%30-40	%40-50	>%50
Land use pattern		Protected Area	Unclaimed	Settlement	Industrial	Agricultural
Natural protection degradation		>%80	%60-80	%40-60	%40-20	<%20
Coastal protection structures		>%50	%30-50	%20-30	%5-20	<%5

Illustration 46 – Paramètres physiques et humains pris en compte dans le calcul du CVI (Özyurt *et al.*, 2010a).

En revanche, le poids que représente la vulnérabilité de chaque paramètre est déterminé de manière quantitative par un processus de hiérarchie analytique (AHP) afin d'éliminer la subjectivité de l'opinion d'expert incluse dans la méthode de Gornitz.

A partir du rang de chaque paramètre, un premier indice peut être calculé :

$$CVI_{impact} = \frac{(\sum_1^n PP_n * R_n * W_n) + (\sum_1^m PP_m * R_m * W_m)}{CVI_{leastvulnerable}}$$

Où : CVI_{impact} : indice de l'impact physique ;
 PP_n : paramètres physiques ;
 HP_m : paramètres humains ;
 R : rang des paramètres ;
 W : poids de chaque paramètre assigné par AHP ;
 $CVI_{leastvulnerable}$: cas le moins vulnérable pour un impact physique particulier.

A partir de cet indice, le CVI (SLR³) peut être calculé de la façon suivante :

$$CVI (SLR) = \frac{\sum \text{paramètres d'impact d'un groupe}}{\sum \text{le moins vulnérable cas du groupe}}$$

Ce CVI (SLR) a été appliqué sur deux côtes de morphologies différentes de Turquie. Le premier site où a été appliquée cette méthodologie est le Delta de Göksu. Cette zone est un delta avec des lagons et des dunes dans lequel les activités humaines et socio-économiques sont importantes. L'autre site d'étude est celui d'Amasra situé sur la côte de la Mer Noire. Cette zone montre différentes morphologies allant des hautes falaises aux plages étroites accompagnées d'un régime de houles fort (houles de 8 mètres avec une période de retour de 100 ans). L'illustration 47 présente la matrice utilisée pour le calcul du CVI (SLR) d'Amasra.

³ SLR : Sea Level Rise

Impact	Physical Parameters						Human Influence Parameters						Impact Total				
	Parameter	1	2	3	4	5	W	Total	Parameter	1	2	3		4	5	W	Total
1. Coastal Erosion	P1.1 Rate of Sea Level Rise						0.09	0.27	H1.1 Reduction of Sediment Supply	1					0.4	0.40	
	P1.2 Geomorphology	1					0.17	0.17	H1.2 River Flow Regulation	1					0.13	0.13	
	P1.3 Coastal Slope		1				0.11	0.22	H1.3 Engineered Frontage		1				0.2	0.40	
	P1.4 H _{1/10}					1	0.18	0.90	H1.4 Natural Protection Degradation		1				0.12	0.24	
	P1.5 Sediment Budget			1			0.37	1.10	H1.5 Coastal Protection Structures			1			0.15	0.46	
	P1.6 Tidal Range					1	0.08	0.41									
	TOTAL		1	1	2	0	2	3.07	TOTAL		2	2	1	0	0	1	1.63
2. Flooding due to Storm Surge	P2.1 Rate of Sea Level Rise			1			0.08	0.25	H2.1 Engineered Frontage		1				0.32	0.65	
	P2.2 Coastal Slope		1				0.18	0.37	H2.2 Natural Protection Degradation		1				0.48	0.97	
	P2.3 H _{1/10}					1	0.57	2.86	H2.3 Coastal Protection Structures			1			0.19	0.58	
	P2.4 Tidal Range					1	0.16	0.82									
	TOTAL		0	1	1	0	2	4.29	TOTAL		0	2	1	0	0		2.19
3. Inundation	P3.1 Rate of Sea Level Rise			1			0.35	1.06	H3.1 Natural Protection Degradation		1				0.63	1.25	
	P3.2 Coastal Slope		1				0.47	0.94	H3.2 Coastal Protection Structures			1			0.36	1.07	
	P3.3 Tidal Range					1	0.18	0.89									
	TOTAL		0	1	1	0	1	2.89	TOTAL		0	1	1	0	0		2.32
4. Salt Water Intrusion to Groundwater Resources	P4.1 Rate of Sea Level Rise			1			0.04	0.11	H4.1 Groundwater consumption				1		0.7	2.80	
	P4.2 Proximity to Coast			1			0.09	0.28	H4.2 Land Use Pattern			1			0.3	0.90	
	P4.3 Type of Aquifer			1			0.6	1.79									
	P4.4 Hydraulic Conductivity			1			0.08	0.24									
	P4.5 Depth to Groundwater Level Above Sea	1					0.19	0.19									
TOTAL		1	0	4	0	0	2.62	TOTAL		0	0	1	1	0		3.70	3.38
5. Salt Water Intrusion to River/Estuary	P5.1 Rate of Sea Level Rise						0.13	0.00	H5.1 River Flow Regulation						0.71	0.00	
	P5.2 Tidal Range						0.09	0.00	H5.2 Engineered Frontage						0.14	0.00	
	P5.3 Water Depth at Downstream						0.34	0.00	H5.3 Land Use Pattern						0.14	0.00	
	P5.4 Discharge						0.45	0.00									
	TOTAL		0	0	0	0	0	0.00	TOTAL		0	0	0	0	0	0.00	0.00

CVI(SLR)-3 **2.94**

Illustration 47 – Matrice du CVI (SLR) générée pour le littoral d'Amasra (Özyurt et al., 2010b).

La méthode de l'indice de vulnérabilité côtière comporte certains avantages et limites exposés sur l'illustration 48.

Données de base	Avantages	Limites
<p><u>Approximation de:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ La topo-bathymétrie ✓ L'élévation du niveau marin relatif ✓ L'amplitude de la marée ✓ La géologie ✓ La géomorphologie ✓ Les tendances du recul du trait de côte ✓ La hauteur des vagues ✓ Des paramètres liés à l'activité humaine 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Evaluation rapide des zones vulnérables ✓ Peu de données nécessaires ✓ Application long-terme et grande échelle 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Données non disponibles parfois ✓ Le poids donné à chaque paramètre est qualitatif sauf si utilisation d'AHP ✓ CVI ne donne que les régions vulnérables; des analyses doivent être entreprises dans ces zones pour obtenir une prédiction future quantitative ✓ Méthode simpliste qui néglige des paramètres (ex : disponibilité en sédiment...)

Illustration 48 – Avantages et limites de la limite du CVI.

6. Approches diverses

6.1. L'APPROCHE PROBABILISTE

Les différents modèles exposés précédemment sont des modèles déterministes c'est-à-dire qu'ils fournissent une seule et unique solution en sortie de modèle. Cependant, d'autres modèles existent et sont basés sur une approche probabiliste.

Ce type d'approche a pour but de quantifier l'incertitude sur les solutions en sortie de modèle, contrairement à l'approche déterministe qui ne donne qu'une solution unique souvent sans aucune information sur sa précision.

L'incertitude du modèle réside principalement dans 4 sources :

- l'incertitude sur les changements climatiques eux-mêmes ;
- l'incertitude sur l'effet du changement climatique, sur le niveau de la mer et sur le régime des vagues ;
- l'incertitude sur les processus en modélisant la réponse de la plage aux changements climatiques ;
- l'incertitude sur la disponibilité et la précision des données.

A l'aide de séries temporelles de mesures de terrain (élévation du niveau marin, longueur du profil actif, largeur de l'arrière-dune...), l'analyse probabiliste va créer une fonction de densité de probabilité d'occurrence pour chaque paramètre mesuré et entré dans le modèle (cf. illustration 49B). A partir de ces fonctions, une simulation stochastique va être appliquée. En d'autres termes, un algorithme va choisir de manière aléatoire une valeur pour chaque paramètre (S, L*...) du modèle. Cette valeur sera comprise dans la fonction de densité de probabilité du paramètre.

Le modèle va ensuite être appliqué plusieurs fois à l'aide des valeurs de paramètres choisis par la simulation afin d'obtenir une fonction de densité normale du recul du trait de côte (cf. illustration 49C). Le caractère aléatoire de la simulation donne donc une solution différente à chaque fois que le modèle est appliqué. En effet, les valeurs des paramètres utilisées lors de chaque modélisation sont différentes.

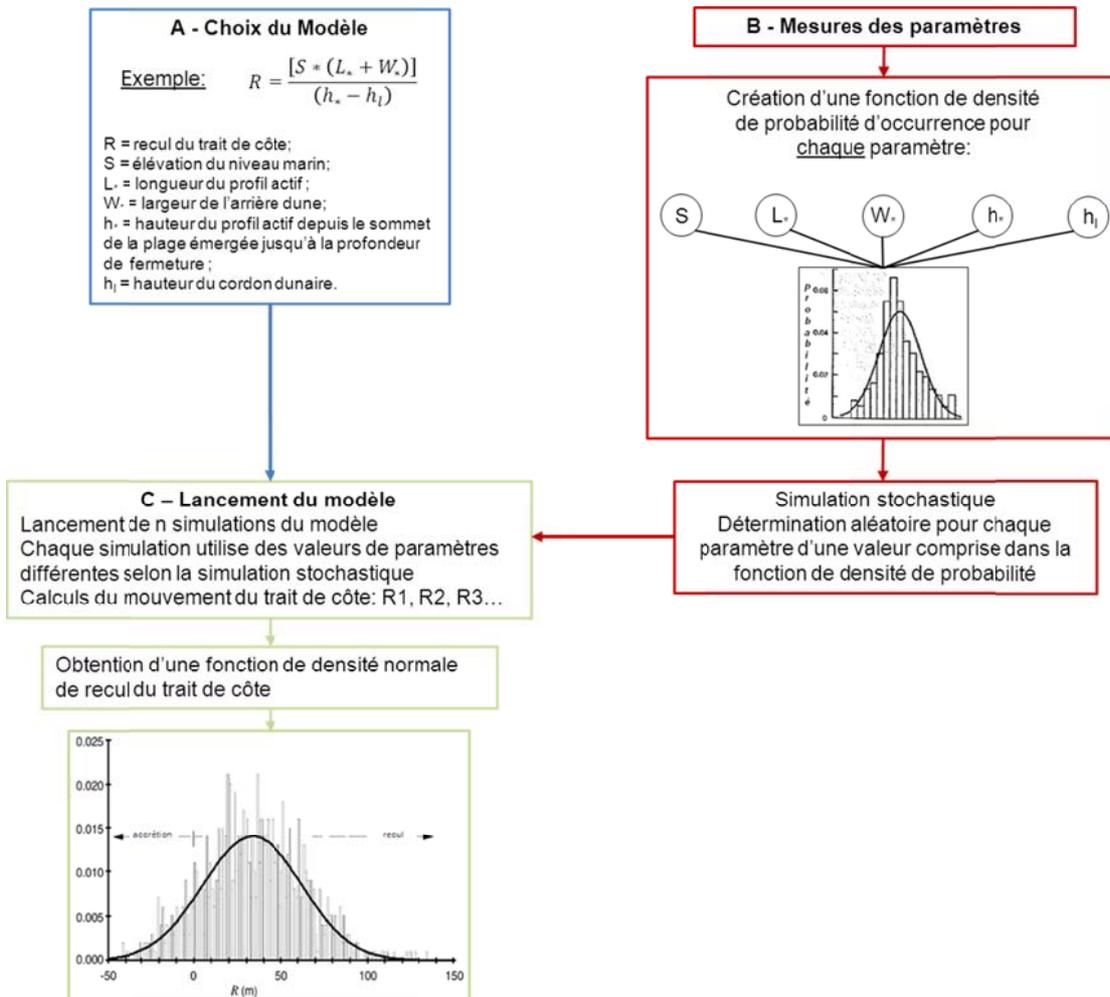


Illustration 49 – Exemple de la fonction de densité normale du recul (R) du trait de côte (Cowell et al, 2006).

Cowell *et al.* (2006) ont appliqué l'approche probabiliste sur deux sites pour prévoir la réponse de la plage à l'élévation du niveau marin et y inclure les effets de l'incertitude sur la géométrie de la côte future.

Le premier site d'étude est « Manly beach » à Sydney en Australie. Cette zone constitue une cellule sédimentaire fermée où l'on trouve des digues ainsi qu'un récif. Ils ont étudié ce cas pour inclure les incertitudes liées à la présence d'un récif et d'ouvrages de protection.

Le deuxième site sur lequel ils ont utilisé l'approche probabiliste en utilisant le modèle STM (cf. partie 3.2.5) est « Mission Beach » à San Diego (Californie). Ce site qui est une plage ouverte a été étudié pour prendre en compte l'incertitude sur le budget sédimentaire de la cellule sédimentaire. En effet, dans la partie Sud de « Mission Beach », il y a perte et gain de sédiment du fait de la présence de la « San Diego River » et de « la Mission Bay ».

Les avantages et limites de cette méthode sont présentés sur l'illustration 50.

Données de base	Avantages	Limites
<u>Données de base variables en fonction du type de modèle utilisé:</u> ✓ Données topo-bathymétriques ✓ Données de houle ✓ Profondeur de fermeture ✓ Données lithologiques et géomorphologiques ✓ Type de structures existantes ✓ Informations sur les transits sédimentaires	✓ Ne coûte pas cher en temps de calcul ✓ Basé sur des données de terrain donc la connaissance de toute la complexité des processus physiques de la dynamique côtière n'est pas nécessaire	✓ Beaucoup de données sont nécessaires sur une échelle de temps conséquente ✓ La représentativité et la précision des données

Illustration 50 – Tableau regroupant les avantages et limites de la méthode probabiliste.

6.2. L'APPROCHE SYSTEMIQUE

Les précédents modèles exposés se focalisent sur les changements climatiques et l'augmentation du niveau de la mer. Or, l'approche exposée par Brommer et Bochevvan der Burgh (2009) montre que l'attention ne devrait pas seulement se porter sur l'augmentation du niveau marin mais aussi sur les changements liés aux sources sédimentaires (fleuves...), aux paysages d'arrière-pays et à l'activité socio-économique près de la côte.

Ainsi, dans leur modèle intégré, ils ajoutent ces trois influences à la dynamique à long terme du trait de côte modélisée généralement (cf. illustration 51). Les processus fluviaux tels que la décharge de sédiment par les fleuves peuvent être modélisés par le modèle BQART/HydroTrend qui est un modèle hydrologique forcé par le climat.

Le comportement de la population et donc l'évolution socio-économique est difficile à prévoir sur le long terme. Les techniques les plus utilisées sont les modèles « Agent-Based Model (ABM) » ou « Land Use » qui simulent l'effet de la population sur les paysages et la nature. Le modèle « Land Use » a notamment été utilisé aux Pays-Bas pour avoir des prévisions à l'horizon 2030 tenant compte des scénarios démographiques et économiques. Toutefois, ce modèle ne prend pas en compte les interactions entre le comportement humain et l'évolution naturelle.

Cette approche novatrice prend en compte beaucoup de paramètres tels que l'évolution démographique qui n'est pas prise en compte dans les autres modèles. Néanmoins, les incertitudes sur les modèles d'évolution sont assez conséquentes.

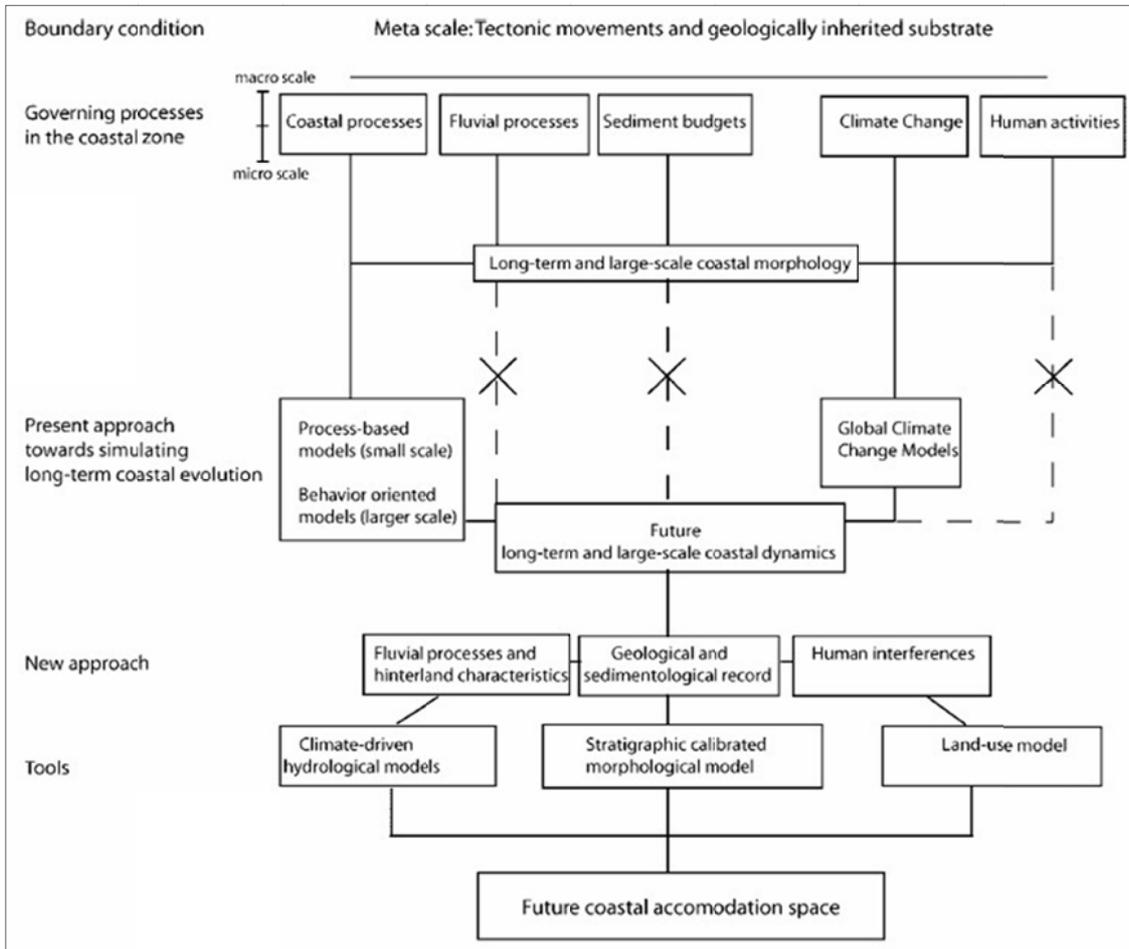


Illustration 51 – Diagramme illustrant la méthode intégrée de Brommer et Bochev-van der Burgh (2009).

7. Conclusion

L'évolution future des morphologies côtières est un phénomène particulièrement dur à appréhender. Elle résulte en effet de l'interaction de multiples facteurs naturels et anthropiques qui sont parfois difficiles à quantifier.

Il existe à l'heure actuelle de nombreux modèles et méthodes pour estimer cette évolution à plus ou moins long terme. Ces modèles ont des caractéristiques et des finalités différentes. Ils peuvent être classés en 3 groupes :

- Les modèles de processus et les modèles comportementaux ;
- Les modèles statistiques ;
- Les approches qualitatives.

- **Les modèles de processus et les modèles comportementaux :**

Les approches modélisatrices ne se fondent pas sur l'évolution passée du trait de côte mais elles cherchent à modéliser son comportement futur par le biais de formules ou d'équations prenant en compte les facteurs intervenant dans la dynamique littorale (régime de houles, courants, flux sédimentaires, élévation du niveau marin...). Les méthodes qui relèvent de ce type d'approche sont nombreuses et peuvent être divisées en deux classes :

- les modèles numériques d'ingénierie (GENESIS, GENCADE, UNIBEST) ;
- les modèles analytiques basés sur des formules empiriques.

Les modèles d'ingénierie littorale sont les plus élaborés. Les formules et équations qu'ils font intervenir sont souvent extrêmement complexes. Ils requièrent en effet de nombreuses données de base telles la position du trait de côte à différentes époques, les profils de plage, les caractéristiques des houles (direction, Hs), le type de structures existantes, la localisation et le degré de perméabilité des infrastructures au transit sédimentaire ou encore les dates et volumes des rechargements et/ou extractions de plages. En revanche, ils peuvent être appliqués à une grande variété de situations. En effet, ils permettent de travailler à grande échelle mais également à échelle locale dans la mesure où ils peuvent prendre en compte l'impact des ouvrages de protection sur l'évolution côtière mais également pour les modèles GENCADE et UNIBEST l'influence des tempêtes.

Malgré l'utilisation d'équations complexes pour décrire les processus hydrodynamiques, ces modèles d'ingénierie littorale comportent certaines limites liées notamment à cette multitude de facteurs intégrés aux équations et à l'incertitude des hypothèses de base.

D'après Paskoff (2001), si de telles méthodes permettent de mieux comprendre l'action des processus littoraux et peuvent être utiles pour prévoir de manière localisée le

comportement d'un rivage à court terme, elles ne sont dans l'ensemble pas adaptées à une prévision à l'échelle de plusieurs décennies et sur de vastes secteurs notamment en raison de la complexité et de la diversité des processus naturels qui entrent en jeu et qui ne peuvent se résumer par des équations.

Les Modèles analogiques reposent sur des formules simples inspirées du principe de Brüun et sont relativement faciles à mettre en place. Ces approches présentent l'intérêt majeur d'intégrer les effets d'une éventuelle accélération du niveau marin sur l'évolution future de la ligne de rivage.

Cependant, elles se heurtent à l'extrême complexité des interactions qui entrent en jeu dans la dynamique littorale. En effet, ces méthodes nécessitent, pour pouvoir être appliquées, la détermination de paramètres aléatoires (largeur du profil actif, profondeur de fermeture, G) qui pourraient influencer sur la précision des résultats.

A l'heure actuelle, il ressort donc que la loi de Brüun est difficile à appliquer et qu'elle ne peut s'adapter qu'à un nombre restreint de cas. Elle est par exemple inadaptée aux rivages comme ceux de l'ouest du Golfe du Lion où le budget sédimentaire des plages est très variable sous l'action de transferts longitudinaux et transversaux importants. Les formules dérivées (Mehta *et al.*, Kriebel et Dean...) permettent alors d'élargir son champ d'application à ce type de littoraux en ajoutant aux paramètres de la formule de Brüun des éléments supplémentaires.

- **Les modèles statistiques**

La plupart des modèles statistiques étudiés dans ce rapport sont basés sur les tendances historiques. Ce type d'approche qui consiste à analyser le comportement passé d'un littoral afin d'en prédire par extrapolation l'évolution dans les décennies à venir suppose une étude précise de la cinématique récente du trait de côte. Cette analyse est souvent réalisée à partir de photographies aériennes, voire de cartes anciennes ou encore de longues séries temporelles de profils topo-bathymétriques à partir desquelles sont tracées les différentes positions du trait de côte et ne nécessite aucune autre donnée particulière. La précision sur le levé du trait de côte est cependant nécessaire pour l'application de la méthode de la moyenne des taux (AOR).

Ces méthodes d'approche statistique peuvent être appliquées à tous les types de littoraux mais sont cependant plus adaptées aux littoraux naturels. En effet, ce genre de méthodes implique que les tendances historiques observées sont représentatives de l'avenir. Or, l'éventuelle construction d'ouvrages de protection tels les épis ou les brise-lames influe sur la dynamique naturelle et peut freiner l'érosion ce qui pourrait entacher d'erreurs les résultats.

D'après Paskoff (2001), l'approche historique constitue la démarche la plus adaptée en matière d'analyse prévisionnelle à échéance de plusieurs décennies. Elle repose en effet sur un laps de temps suffisamment long pour avoir permis l'occurrence de

tempêtes qui font évoluer le littoral de façon significative. Pour obtenir de meilleurs résultats, ce laps de temps doit être de préférence deux fois supérieur à la durée de la prévision d'après les recommandations de Crowell et al., (1997). Elle ne permet pas, en revanche, de prendre en compte de manière satisfaisante les variations à court terme.

- **Les approches qualitatives**

Les approches qualitatives étudiées dans ce rapport (zone tampon, avis d'experts) sont faciles à appliquer sur des échelles locales ou régionales et pour n'importe quel type de littoral en raison du nombre limité de données quantitatives précises requises. En effet, elles reposent sur une connaissance des processus régionaux et sur une analyse qualitative des données disponibles. A titre d'exemple les données topobathymétriques sont utilisées pour qualifier la morphologie des cordons dunaires en terme d'élévation. Une différenciation entre des dunes « basses » ou « hautes » sera établie mais aucun recourt à un MNT ne sera effectué. Par ailleurs, les précisions sur le profil de plage ou le volume de sédiments érodés ne seront pas calculées.

Ces approches ne sont donc pas fondées sur les processus physiques entrant en jeu dans la dynamique littorale. Leur application relève alors de l'appréciation personnelle des experts qui réalisent les études. Les résultats sont donc quelque peu subjectifs et ces méthodes pourraient s'avérer être moins pertinentes que les méthodes précédentes dans l'estimation de la position future du trait de côte.

Il apparaît toutefois que la méthode du « dire d'experts » soit plus valide que l'application d'une zone tampon. Dans le cas du projet RNACC (Yates Michelin et al., 2010) cette dernière méthode surestime en effet les surfaces affectées par l'érosion et ne tient pas compte de la variabilité spatiale le long la côte (cf. illustration 52). Elle suppose qu'une estimation très conservatrice est la meilleure manière de tenir compte de toute la variabilité possible. Pourtant, avec cette estimation conservatrice, l'utilisation d'une zone tampon pour identifier les zones sensibles ne pourrait pas être un guide pour les gestionnaires de la zone côtière car il n'existe pas de distinctions entre les zones plus ou moins susceptibles à l'érosion.

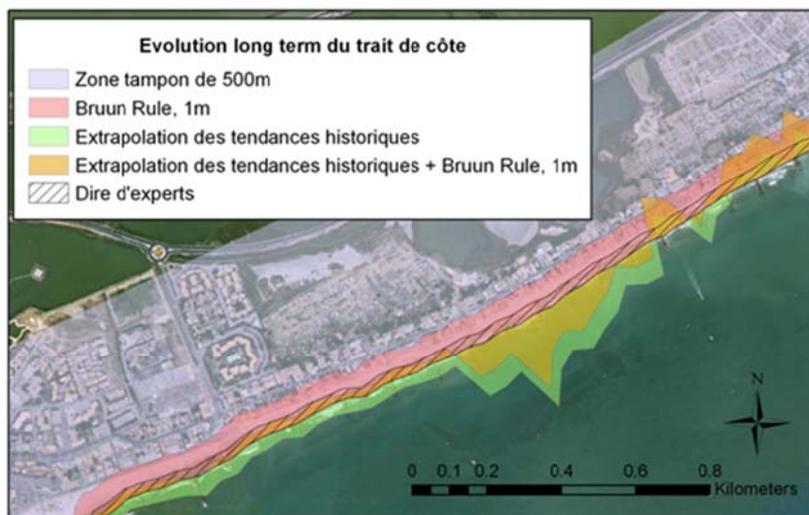


Illustration 52- Exemple d'évolution long terme sur le littoral de Palavas-les-Flots (Yates Michelin et al., 2010).

Toutes les méthodes précédemment analysées dans ce rapport sont synthétisées dans les tableaux de l'illustration 53.

		Principe/Formule	Avantages	Limites	Exemple
	Les modèles d'ingénierie moyen-terme simplifiés	Simplification des calculs des modèles morpho-dynamiques ou application d'une géométrie simple pour des modèles 2DH.	1) Temps de calcul diminué donc possibilité de prévision long terme sans dégénérescence. 2) Basé sur des modèles dont les résultats sont satisfaisants à court et moyen terme.	1) N'inclut pas forcément les processus importants sur le long terme. 2) Inclut uniquement les processus pris en compte sur le court terme.	1) Approche intégrée à Telemac. 2) Le modèle 2DH Hybride utilisé par Kristensen et al. (2011).
	Analyse de stabilité linéaire	Basé sur les perturbations bathymétriques d'un état de base à pente uniforme. Dans certains cas ces perturbations sont amorties dans d'autres elles évoluent vers des figures bathymétriques.	1) Ces modèles nécessitent moins de données que les modèles classiques (Telemac...). 2) Ne coûte pas cher en temps de calcul. 3) Analyse de processus plus facile.	1) Réalisation d'une analyse de stabilité très complexe. 2) Pas de modèle d'analyse de stabilité distribué en ligne. 3) Problème de validation de la méthode.	1) Dunes et bancs de sable (Université de Twente, NL). 2) Barres sableuses (Université de Barcelone, S).
Les modèles d'ingénierie long-terme	GENESIS	Modèle numérique semi-empirique destiné à simuler les changements à long terme de la ligne de rivage en réponse à l'implantation d'équipements littoraux susceptibles de modifier le transport sédimentaire longitudinal. Ce modèle suit le concept « One-line ».	1) Peut être appliqué à une grande variété de situations. 2) Prise en compte des ouvrages de protection. 3) Prise en compte des rechargements de plage.	1) Incertitude des hypothèses de base. 2) Utilisation de données moyennées ou de valeurs constantes. 3) Pas de prise en compte des conditions extrêmes.	1) Application dans le projet EUROSION (2004). 2) Application sur les plages du Languedoc-Roussillon par Paul Durand (1999).
	GENCADE	Ce modèle numérique simule les changements de la plage et de la dune en réponse aux processus cross-shore responsables de l'engraissement des dunes par le vent et de l'érosion des dunes par les tempêtes, sans oublier de prendre en compte le gradient du transport sédimentaire longshore.	1) Prise en compte des changements transversaux liés aux tempêtes.	1) Incertitude des hypothèses de base. 2) Utilisation de données moyennées ou de valeurs constantes.	1) Application sur les côtes de Westhampton Beach aux Etats-Unis par Hanson et al. (2010).
	UNIBEST-CL+	UNIBEST-CL+ est un modèle d'équilibre de sédiments avec lequel les transports par la dérive littorale calculés sur des points spécifiques le long de la côte peuvent être traduits en migration du trait de côte. L'application typique est l'analyse de la morphologie à grande échelle des systèmes côtiers pour évaluer les causes de l'érosion ou prévoir l'impact d'une infrastructure côtière envisagée sur la côte.	1) Modèle approprié pour étudier l'impact des structures côtières sur l'évolution du trait de côte. 2) Application à grande échelle ou à échelle locale. 3) Prise en compte des apports sédimentaires, de l'élévation du niveau de la mer...	1) Nombre de données nécessaires conséquent. 2) Calibration difficile. 3) Transport sédimentaire toujours calculé parallèlement à la côte; modèle non approprié pour certaines géométries de côtes.	1) Etude de l'impact des structures côtières sur l'évolution du trait de côte en Bulgarie dans la Mer Noire par F.A. de Bruijn, C.D. Erdbrink (2005).
Les modèles basés sur le principe de Brün	La loi de Brün	$R = S \cdot \left[\frac{L}{(B+h)} \right] = S \cdot \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right)$ S = élévation du niveau de la mer ; L = largeur du profil actif ; B = hauteur de la plage émergée ; h = profondeur de fermeture ; R = recul du trait de côte ; α = pente de la plage.	1) Applicable facilement aux grandes échelles spatiales. 2) Nombre limité de variables requises. 3) Simple à appliquer. 4) Prend en compte l'impact de l'élévation du niveau marin.	1) Ne tient compte que de l'élévation du niveau marin et néglige les aspects hydrodynamique et granulométrique. 2) Cette augmentation du niveau de la mer cause toujours un recul du profil de plage. 3) Ce recul est supposé linéaire. 4) Repose sur 2 paramètres aléatoires, à savoir la profondeur de fermeture (h) et la largeur du profil actif (L). 5) Suppose un budget sédimentaire à l'équilibre. 6) Ne s'applique que sur des sites très restreints.	1) Application entre Frontignan et La Grande Motte, Yates Michelin et al. (2010).
	La méthode de Kriebel et Dean (1985)	$R = S \cdot (L/h + B) + \left[\frac{Q \cdot p / 100}{(h + B)} \right]$ R = recul du trait de côte ; S = élévation du niveau marin ; L = longueur du profil actif ; h = profondeur de fermeture ; B = hauteur de la plage émergée, y compris l'avant dune ; Q = gain ou perte de sédiments en m ³ le long du profil actif pour une période de temps donnée ; p = pourcentage de matériel sableux.	1) S'applique à un grand nombre de littoraux puisqu'elle intègre les effets du transport longitudinal, responsable du budget sédimentaire.	1) Rien ne dit qu'une plage dont le bilan est déséquilibré, réponde à l'élévation du niveau marin en suivant la loi de Brün. 2) La précision sur Q.	
	La méthode généralisée de Dean et Mauremeyer (1983)	$R = \frac{[S \cdot (L_x + W_x)]}{(h_x - h_l)}$ R = recul du trait de côte ; S = élévation du niveau marin ; L = longueur du profil actif ; W = largeur de l'arrière dune depuis le sommet de la berme jusqu'au pied de dune ; h = hauteur du profil actif depuis le sommet de la plage émergée jusqu'à la profondeur de fermeture ; h _l = hauteur du cordon dunaire.	1) Applicable à de nombreux sites : elle permet de prendre en compte la présence d'un cordon dunaire et d'une lagune.	1) Reprend les limites de la loi de Brün en y ajoutant des incertitudes sur la mesure de h _l et W.	1) Méthode appliquée sur les côte de la Mer Caspienne par Kaplin et Selivanov (1995).
	La méthode de Mehta et al (1991)	$R_x = \left[S_x \cdot \left(\frac{L}{H} + B \right) \right] + G$ x = nombre d'années ; R _x = évolution du trait de côte ; S _x = élévation du niveau marin ; L = longueur du profil actif ; H = profondeur de fermeture ; B = hauteur de la plage émergée ; G = facteur de déviation spécifique au site ; Calcul de l'évolution future : Pour un taux d'élévation S _y différent dans le futur, on suppose que le facteur spécifique G restera inchangé ; la nouvelle valeur d'évolution R _y $R_y = R_x + (S_y - S_x) \cdot \left(\frac{L}{H} + B \right)$	1) Avec l'association du facteur spécifique G dans la formule de Brün, cette méthode combine une approche de type historique, similaire à la méthode des points extrêmes.	1) Elle regroupe les critiques émises pour la méthode des points extrêmes et celle de la formule de Brün.	
	La loi de Brün couplée au recul historique	$R_{future} = R_{historique} + (S_{future} - S_{historique}) \cdot \frac{L}{(B+h)}$ L = largeur du profil actif ; B = hauteur de la plage émergée ; h = profondeur de fermeture ; R _{historique} = recul calculé grâce à l'extrapolation des tendances historiques ; S = élévation du niveau marin.	1) Tient compte de plusieurs processus importants grâce à la combinaison des tendances historiques et de l'impact d'un changement des forçages dans le futur avec l'application de la loi de Brün. 2) Adaptée pour l'estimation de l'évolution à long terme du trait de côte aux échelles locales. 3) Tient compte de la variabilité spatiale.	1) Cette formule tente de prendre en compte une multitude de processus avec l'utilisation des tendances historiques et donc a besoin de beaucoup de données. 2) Formule un peu simpliste.	1) Application entre Frontignan et La Grande Motte, Yates Michelin et al. (2010).

		Principe/Formule	Avantages	Limites	Exemple
MODELES STATISTIQUES	La méthode de régression linéaire	Les différentes positions du trait de côte historique sont placées dans un graphique. Puis, à l'aide des points historiques une droite de régression linéaire est tracée permettant d'obtenir par extrapolation la position du trait de côte futur.	1) L'influence de la géologie, de la géomorphologie locale, du climat de vagues, de l'élévation du niveau marin actuel, du bilan sédimentaire et d'autres forçages importants sont implicitement intégrés dans les tendances historiques mesurées. 2) Facile à mettre en place. 3) Capacité d'estimer une marge d'incertitude par le biais d'un intervalle de confiance.	1) Les événements et les tendances historiques observés sont représentatifs de l'avenir. 2) Nécessité d'avoir beaucoup de données aux échelles spatiales et temporelles. 3) Données réparties de manière irrégulière dans le temps, ce qui confère aux données isolées un poids plus important dans le calcul de la tendance évolutive à long terme. 4) L'évolution d'un rivage se résume à une tendance linéaire.	1) Application sur les plages de Maguelone par Durand et Heurteufeu (2006).
	La méthode de Fenster et al (1993)	Pour un site qui est exposé à deux tendances évolutives différentes dans le laps de temps de l'étude, l'application d'une régression polynomiale est nécessaire. Elle permet d'obtenir un point critique à partir duquel une régression linéaire va être tracée.	1) Permet d'adapter la technique de la régression linéaire à un grand nombre de littoraux.	1) Calcul sur des échantillons de données très réduits et couvrant un intervalle de temps limité.	1) Application sur les sites de Sainte-Marie à Sète par Durand (1999).
	La méthode des points extrêmes	Calculer un taux d'érosion moyen à partir de la position du trait de côte au début et à la fin de la période d'étude et extrapoler ce taux dans le futur.	1) Ne prend en compte que deux valeurs.	1) Prise en compte seulement de deux valeurs. 2) Le taux moyen d'érosion peut varier en fonction des deux données utilisées.	1) Application sur les sites de Sainte-Marie à Sète par Durand (1999).
	La méthode de la moyenne des taux par Foster et Savage (1989)	Nécessité de connaître les positions du trait de côte dans le passé pour plus de deux dates. Puis, calculer les taux moyens annuels d'érosion entre chacune des dates disponibles et faire la moyenne entre tous les taux obtenus. Seuls les taux moyens supérieurs, à un critère de temps minimal sont utilisés : $T_{min} = \frac{\sqrt{(E_1^2 + E_2^2)}}{R_1}$ E ₁ = erreur dans la détermination du premier point ; E ₂ = erreur dans la détermination du second point ; R ₁ = taux moyen d'évolution sur la période considérée.	1) Alternative plus précise à la méthode des points extrêmes.	1) Revient à donner plus de poids aux taux d'évolution calculés sur de courtes périodes. 2) La définition du critère de temps minimal semble artificiel.	1) Application sur les sites de Sainte-Marie à Sète par Durand (1999).
	Les modèles basés sur des fonctions mathématiques	Modèle basé sur des données de terrain auxquelles on applique des fonctions mathématiques telles que l'EOF, CAC et la POP.	1) Ne coûte pas cher en temps de calcul. 2) Basé uniquement sur des données de terrain; la connaissance de toute la complexité des processus physiques de la dynamique côtière n'est pas nécessaire.	1) Beaucoup de données sont nécessaires sur une échelle de temps conséquente. 2) La représentativité et la précision des données.	1) Application dans le projet PACE par Cowell et al. (2003) sur les côtes hollandaises, australiennes et des Etats-Unis.
MODELES QUALITATIFS	L'avis d'experts	Evaluation basée sur les expériences antérieures des experts et sur les connaissances régionales. Données requises souvent plus qualitatives que quantitatives.	1) Peu de données quantitatives sont nécessaires. 2) Données pourraient être qualitatives et basées sur les expériences d'experts.	1) Les résultats sont subjectifs.	1) Application entre Frontignan et La Grande Motte, Yates Michelin et al. (2010).
	La zone tampon	Application d'une zone tampon autour des zones érodables.	1) Facilement appliquée aux échelles régionales et couvre une période temporelle indéterminée. 2) N'est pas limitée par des hypothèses des forçages causant l'évolution long terme. 3) N'a pas besoin de données précises pour son application.	1) La définition de la largeur de cette zone est arbitraire et n'est pas basée sur des processus physiques. 2) Méthode simpliste.	1) Application entre Frontignan et La Grande Motte, Yates Michelin et al. (2010).
	Le "Coastal Vulnerability Index" CVI	Le CVI est un indice qui caractérise la vulnérabilité aux aléas côtiers tels que l'érosion et la submersion marine liées à l'élévation du niveau marin. Il prend en compte différents paramètres physiques contrôlant la sensibilité de la zone côtière à l'élévation du niveau marin.	1) Evaluation rapide des zones vulnérables. 2) Peu de données nécessaires. 3) Application à long terme et à grande échelle. 4) Application du CVI d'Özyurt et al : plus précis et moins subjectif dans l'attribution des poids des paramètres.	1) Données non disponibles parfois. 2) Poids qualitatif donné à chaque paramètre sauf si utilisation du modèle AHP. 3) CVI ne donne que les régions vulnérables; des analyses doivent être entreprises dans ces zones pour obtenir une prédiction future quantitative. 4) Méthode simpliste qui néglige des paramètres (ex : disponibilité en sédiment...).	1) Application sur différentes côtes des Etats-Unis et du Canada par Shaw et al. (1998). 2) Application sur deux côtes de morphologies différentes en Turquie par Özyurt et al. (2010).

Illustration 53 – Tableau de comparaison des différentes méthodes d'analyse de l'évolution du trait de côte synthétisées dans ce rapport.

8. Bibliographie

Brommer M.B, Bochev-van der Burgh L.M, (2009) – Sustainable Coastal Zone Management: A Concept for Forecasting Long-Term and Large-Scale Coastal Evolution. *Journal of Coastal Research*, 25(1), 181-188. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Brüun, P., (1962) – Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal Waterways and Harbours Division*, **88(1-3)**, 117-130p.

Chesher T.J and Miles G.V., (1992) – The concept of a single representative wave for use in numerical models of long term sediment predictions. *Ashgate Publishing Ltd*, Aldershot, 371 p.

Cowell P.J., Roy P.S., and Jones R.A., (1995) – Simulation of largescale coastal change using a morphological behaviour model. *Marine Geology*, 126. 45–61.

Cowell P.J., Stive M.J.F.; Niedoroda A.W., Swift D.J.P., DE Vriend H.J., Buijsman M.C., Nicholls R.J., Roy P.S., Kaminsky G.M., Cleveringa J., Reed C.W. and DE Boer P.L., (2003b) – The coastal-tract (part 2): applications of aggregated modeling to low-order coastal change. *Journal of Coastal Research*, 19, 828–848.

Cowell P.J., Thom B. G., Jones R.A., Everts C. H., Simanovic D., (2006) – management of Uncertainty in predicting climate-change impacts on beaches. *Journal of Coastal Research*, 22(1), 232-245. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Crowell M., Douglas B.C, Leatherman S.P., (1997) – On forecasting future U.S. shoreline positions : a test of algorithms. *Journal of Coastal Research*, **13**, 4, 1245-1255.

De Bruijn F.A., Erdbrink C.D., (2005) – Application of Unibest to model White Lagoon beach enhancement. *Minor thesis Hydraulic Engineering Delft University of Technology*.

Dean R.G., Mauremeyer E.M., (1983) – Models for beach profile responses. In: P.D. Komar (Editor), handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Raton, pp. 151-166.

Dolan R., Fenster M.S., Holme S.J., (1991) – Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 3, 723-744.

Douglas B.C., Crowell M., Leatherman S.P., (1998) – Considerations for shoreline position prediction. *Journal of Coastal Research*, **14**, 3, 1025-1023.

Durand P., (1999) – L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au XXème siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle. Thèse de doctorat, Université lumière Lyon 2, Lyon, France, 461 p.

Durand P., Heurtefeux H., (2006) – Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon lagunaire : Une méthode d'évaluation, exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (2) : p 221-243.

EUROSION, (2004) – Living with coastal erosion in Europe : Sediment and Space for Sustainability. Part III – Methodology for assessing regional indicators, 42p.

Fenster M.S., Dolan R., Elder J.F., (1993) – A new method for predicting shoreline position from historical data. *Journal of Coastal Research*, 9,1, 147-171p.

Foster E.R., Savage R.J., (1989) – Methods for analysis of historic shoreline data. *Proceedings of the 8th symposium on Coastal Sedimentology*, Department of Geology, Florida State University, Tallahassee, 620-634.

GIEC, (2007) – Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

Gornitz V., (1991) – Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*, 89, 379-398.

Hanson H. and Kraus N.C., (1989) – Genesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Corps of Engineers, CERC, Technical Report CERC-89-19, 185 p.

Hanson H., Larson M. and Kraus N.C., (2010) – Modeling long-term beach change under interacting longshore and cross-shore processes. *Proc. 33rd Int. Coastal Eng. Conf., ASCE*.

Himmelstoss E. A. (2009) – DSAS 4.0 "Installation Instruction and User Guide" in: Thieler, E.R. , Himmelstoss E.A., Zichichi, J.L and Ergul, A. – 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGis extension for calculating shoreline change : USGS Open file report 2008-1278 updated for version 4.2.

Hinton C., Townend I.H., and Nicholls R.J., (2007) – Coastal Processes. Chapter 9. In: Thorne C.R., Evans E.P., Penning-Roswell E.C. (eds). *Future Flooding and Coastal Erosion Risk*. Thomas Telford Publishing: London. 528p.

Idier D. et Pedreros R., (2004) – Revues des modèles hydro-sédimentaires et morpho-dynamiques pour les applications en littoral sableux. BRGM/RP-53418-FR, 132 p., 43 fig., 15 tabl., 4ann.

- Kaplin Pavel A., Selivanov Andrew O.**, (1995) – Recent coastal evolution of the Caspian sea as a natural model for coastal responses to the possible acceleration of global sea-level rise. *Marine Geology* 124 (1995) 161-175.
- Kriebel, D.L, Dean R.G.**, (1985) – Numerical simulation of the time dependent beach and dune erosion. *Coastal Engineering*, 9, 221-245p.
- Kristensen S., Deigaard R., Taaning M., Fredsøe J., Drønen N., Jensen J.**, (2011) – Long term morphological modelling. Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, North America, 1, jan. 2011.
- Larson M., Copabianco M., Hulscher S.J.M.H, et al.**, (2003) – Analysis and modeling of field data on coastal morphological evolution over yearly and decadal time scale. Part I: Background and linear techniques. *J. Coastal Res.*, 19.
- Latteux B.**, (1995) – Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. *Mar. Geol.*, 126, 1, p. 29-141.
- Metha A.J, Kraus N.C., Ginerich K.J., Kriebel D. L.**, (1991) – Review notes on cohesive sediment erosion. Proceeding on of Coastal Sediments 91 (eds). ASCE, New-York, 40-53.
- Özyurt G., Ergin A.**, (2010a) – Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator based methodology for decision makers. *Journal of Coastal Research*. March 2010 West Palm Beach (Florida), ISSN0749-0208.
- Özyurt G., Ergin A., Baykal C.**, (2010b) – Coastal vulnerability assessment to sea level rise integrated with analytical hierarchy process. In Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, Vol. 32.
- Paskoff R.**, (2001) – L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, le mythe et la réalité, Institut océanographique, Paris, 200 p.
- Pelnaud-Considere R.**, (1956) – “Essai de Théorie de l'Evolution des Formes de Rivage en Plage de Sable et de Galets,” 4th Journées de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, No. 1, 289-298.
- Pilkey O.H., and Cooper J.A.G.**, (2004) – Society and Sea Level Rise. *Science*, 303, 1781-1782.
- Shaw J., Taylor R.B., Solomon S., Christian H.A., Forbes D.L.**, (1998) – Potential Impacts of Global Sea-Level Rise on Canadian Coasts. *The Canadian Geographer*, 42(4), 365-379
- Yates Michelin M., Le Cozannet G., Lenôte N.**, (2010) – Amélioration de la méthode RNACC : Caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin. BRGM/RP-XXXXX-FR. Rapport Intermédiaire.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

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