
Evolution des fonds autour des ouvrages maritimes

Couplage de modèles : houle, courant, transport de sédiment et évolution des fonds

Jean-Michel Tanguy* — Agnès Jouan**

* *Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable*
Direction de l'Eau, 20, avenue de Ségur
F-75732 Paris SP 07
jean-michel.tanguy@environnement.gouv.fr

** *Ministère de la Défense - Marine Nationale*
Service Technique des Travaux Immobiliers et Maritime
15, rue de Laborde - BP9 F-75008 Paris
agneslavraie@hotmail.com

RÉSUMÉ. La majeure partie du littoral français est constituée de côtes sableuses sur lesquelles ont été construits des ouvrages de protection contre l'effet des houles et des courants. La modélisation numérique a fait de gros progrès ces dernières années et permet de positionner ces ouvrages en fonction du transit littoral, mais également de mettre en évidence leur répercussion sur le milieu. Nous présentons un système de modélisation morphodynamique basé sur le couplage de quatre modèles numériques : propagation de la houle depuis le large jusqu'à la côte, agitation de la houle, hydrodynamique et évolution des fonds afin d'étudier l'impact des ouvrages sur les plages de sable. La validation de ce système de modélisation est basée sur les évolutions mesurées avant et après une tempête autour du brise-lames de Faraman en Camargue au bord de la Méditerranée.

ABSTRACT. The main part of the French coast is sandy and is equipped with maritime works which protect the coast from waves and currents action. Numerical modeling have made big progress the last years and allow studying and positioning these works depending on the characteristics of the local cross shore transport. We present a system of morphodynamic modeling consisting of the coupling of four models: wave propagation and agitation, hydrodynamics and sea bed evolution in order to study the impact of structures on sandy beaches evolution. Validation is based on the measured morphological evolutions around the wave breaker of Faraman in Camargue along Mediterranean French coast before and after a storm.

MOTS-CLÉS : littoral, morphodynamique, modélisation, couplage de modèles, transport de sédiments, houle, courants, évolution des fonds, brise-lames, Faraman, Camargue.

KEYWORDS: sandy coast, morphodynamics, modelling, model coupling, sediment transport, wave, currents, bottom evolution, wave breaker, Faraman, Camargue.

1. Problématique

Sur la majorité de leur linéaire, les littoraux sableux subissent depuis plusieurs décennies une érosion continue de leurs plages. Le recul du trait de côte n'est pas un problème récent, mais son ampleur s'est largement accrue au cours des dernières décennies. Il est dû à l'interaction de plusieurs facteurs :

- le déficit sédimentaire lié à la réduction des apports sableux des fleuves côtiers ;
- les épisodes de tempêtes très violentes dont l'occurrence semble s'amplifier ;
- la lente remontée du niveau marin, susceptible de s'accélérer de manière significative.

1.1. *Les interventions humaines*

A court ou moyen terme, le recul des côtes met en danger les infrastructures urbaines, touristiques et industrielles de la frange littorale, mais également l'intégrité de nombreux espaces naturels. La gestion du trait de côte s'inscrit donc clairement dans le cadre global du développement durable de l'espace littoral où les enjeux naturels, patrimoniaux et socio-économiques sont étroitement imbriqués.

L'occupation du littoral s'est traduite surtout dans la période récente par la recherche d'une certaine fixation artificielle du trait de côte. Cependant ce mode de gestion a montré ses limites à l'occasion d'événements paroxysmiques tels que la tempête de 1999. Si la mise en œuvre d'ouvrages de protection « durs » depuis plusieurs décennies a localement permis de ralentir ou de stopper l'érosion de certains secteurs du littoral, les effets à moyen terme de ces ouvrages sur l'évolution du littoral et sur l'environnement sont souvent négatifs. Ceci est d'autant plus vrai que les conditions climatiques et océanologiques évoluent par effet de serre, ce qui pose le problème de leur efficacité dans le cas d'une augmentation du niveau marin.

Nous nous intéresserons tout particulièrement à l'évolution des fonds autour des ouvrages maritimes. Il est apparu en effet de première importance de mettre au point des outils d'aide à la décision pour analyser le devenir de certaines parties du littoral très sollicités à court et moyen terme, face à des sollicitations qui sont susceptibles d'évoluer ces prochaines années : carence de sédiments, modification du climat des houles, exhaussement du niveau de la mer...

1.2. *Les méthodes de protection des plages sableuses*

La lutte contre l'érosion marine a très longtemps fait l'objet de la part des ingénieurs d'une compréhension très restreinte, limitée à la bande littorale. L'objectif consistait à protéger une zone urbanisée, une infrastructure routière ou encore un immeuble contre le recul de la plage ou de la falaise. C'est ainsi que dans les années 60-70, de nombreux ouvrages « durs » furent construits sur l'ensemble des côtes de tous les pays (plus de 250 ouvrages sur le littoral du golfe du Lion).

Or l'évolution des mentalités, la prise en compte croissante de l'environnement, du développement durable, l'amélioration des connaissances ont été à l'origine d'un certain nombre de constats négatifs sur l'efficacité et les impacts à plus long terme de ces ouvrages. On est passé du littoral à l'écosystème littoral considéré comme un tout, dépassant la plage immergée, s'étendant au-delà des arrière-dunes modelées par le vent. Il a en effet été démontré que le vent contribuait substantiellement aux transferts de sable en liaison avec la plage émergée.

Par ailleurs, l'évolution des ouvrages en place ne cessait de poser des problèmes : après une période d'efficacité plus ou moins longue, certains ouvrages se sont mis à provoquer des désordres en amont et en aval de leur localisation et de plus subissaient eux-mêmes des dégradations.

A la fin des années 70, de nouvelles techniques dites « douces » ont fait leur apparition, comme le rechargement de plage ou des procédés innovants comme le procédé ECOPLAGE. Les dunes, considérées comme des éléments à part entière de la dynamique littorale ont été davantage protégées, notamment par des ganivelles.

Les types d'ouvrages de protection que l'on trouve généralement sur le littoral sont les suivants :

- les digues de protection ont pour but de limiter l'entrée des houles à l'intérieur du port. Elles jouent un rôle important puisqu'elles bloquent le transport littoral, produisant en amont un dépôt et en aval une érosion ;
- les digues frontales sont construites parallèlement au trait de côte existant. Elles ont pour rôle de protéger un port par exemple, mais n'apportent pas de protection aux zones adjacentes ni à la plage en face d'elle ;
- les épis sont construits perpendiculairement à la plage pour interrompre le transport de sable le long du trait de côte ;
- les seuils sont des structures submergées. Ils ont pour objectif de réduire le transport de sédiment perpendiculaire à la plage en agissant telle une barrière, piégeant les sédiments qui parviennent à la plage lors des tempêtes et qui restent bloqués à l'arrière du seuil immergé ;
- les brise-lames peuvent être construits à l'unité ou en batteries de brise-lames alignés. Ils sont placés à proximité de la côte afin de protéger une partie de la plage des houles de tempête et de provoquer un engraissement par les houles de beau temps ;

– le rechargement de plage est une technique consistant à apporter un surplus en sédiment sur la plage. Le sable est généralement prélevé dans une zone éloignée (baie, eaux profondes...) puis acheminé vers la zone de destination. Le processus doit être entretenu. Il nécessite cependant de disposer des stocks sableux, ce qui n'est pas le cas sur toutes les côtes.

Afin d'être en mesure d'appréhender les évolutions morphodynamiques dues à ces modifications sur le trait de côte, à court, moyen et long terme, mais également leurs effets sur l'ouvrage lui-même, il est nécessaire d'avoir recours aux connaissances empiriques constituant le *corpus* de l'Art de l'ingénieur ou encore à des outils d'aide à la décision.

Si les règles de l'art sont applicables à des situations courantes et à des littoraux connus, seuls les outils de modélisation peuvent permettre d'esquisser des évolutions résultant de la diminution des apports sédimentaires des fleuves côtiers ou l'exhaussement du niveau marin dû à l'effet de serre.

1.3. *Echelles de temps et d'espace des processus*

Il faut distinguer ici plusieurs échelles de temps et d'espace :

– les évolutions à court terme : (durée d'une tempête) consistant par exemple en l'évolution des fonds autour d'ouvrages qui atteignent un équilibre assez rapidement : ceci répond à une problématique d'aménageur ;

– les évolutions à moyen terme : (le mois, l'année) consistant par exemple en l'évolution des passes d'entrée des étangs littoraux (étang de l'Ayrolles) ou des bassins à marée (Fier d'Ars) ;

– les évolutions à plus long terme concernant une portion plus ou moins importante du littoral et sur des distances plus grandes, telles que les évolutions du golfe du Lion sur les 50 dernières années : ceci répond à une problématique de gestionnaire, par exemple le domaine public maritime géré par les Services maritimes.

1.4. *Limitation de l'approche proposée*

Compte tenu de l'ampleur du domaine et du fait que l'approche est limitée à l'utilisation de modèles numériques pour simuler les évolutions du trait de côte, nous nous limiterons aux domaines suivants :

– les côtes sableuses, qui sont présentes sur l'ensemble des trois façades métropolitaines : Manche, Atlantique et Méditerranée. Nous ne traiterons ni des estuaires ni des fleuves côtiers où l'on trouve des vases ;

- la partie immergée de la plage, sans lien avec les évolutions du système dunaire. Ces échanges seront cependant abordés dans la partie des perspectives en matière de recherche ;
- une approche spatiale en plan. Nous n'essaierons pas de traiter les phénomènes à l'échelle de la vague ou dans une approche verticale des processus, mais plutôt à l'échelle d'une portion surfacique limitée du trait de côte ;
- proximité des ouvrages où les processus d'évolution dus à la présence de l'ouvrage sont prépondérants par rapport à d'autres processus qui s'exercent à plus grande échelle.

2. Processus mis en jeu

La morphodynamique littorale est le résultat de l'interaction de nombreux processus qui mettent en jeu le vent, les houles, les courants qui créent un mouvement des sédiments en place, et les transportent sur des distances parfois très grandes, provoquant des dépôts et des érosions. Si les processus et leurs interactions sont assez bien appréhendés à court terme (de l'heure au mois) et peuvent être extrapolés à moyen terme (l'année), il n'en est pas de même à long terme.

2.1. Généralités sur les mouvements sédimentaires

Sous l'action des houles et des courants, les sédiments sableux peuvent être soumis à des mouvements différents, suivant les directions perpendiculaire ou parallèle au trait de côte.

2.1.1. Mouvement dans le profil

Au voisinage du fond, la houle crée dans la colonne d'eau des mouvements orbitaux qui engendrent des courants alternatifs sur le fond susceptibles d'entraîner l'oscillation de particules solides. Cependant, les particules peuvent se déplacer dans un sens ou dans l'autre sans qu'il y ait transport en masse. Ce transport n'est vraiment efficace qu'en période de tempête.

2.1.2. Transit littoral parallèle à la côte

Remaniés dans le profil, les sédiments vont également subir un déplacement parallèle à la côte sous l'action des houles obliques. La répartition des vitesses transversalement à ce courant montre un maximum de transit vers la côte entre une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde du point de déferlement.

Pour les sables et notamment pour les sables fins rencontrés sur certaines côtes, il existe deux types de transport littoral : l'un sous l'effet des houles de tempêtes qui s'effectue principalement en suspension (75 à 80 % du transport), l'autre sous

l'action des houles faibles de beau temps qui se traduit par un courant en dent de scie sur la plage et dans le rouleau de déferlement qui prend naissance en bas de plage.

A titre indicatif, certains auteurs (Levoy 1994), (Migniot 1995), (Sabatier 2002) donnent quelques valeurs du transit littoral :

- Safi (Maroc) : transit annuel 250 000 m³, mais une tempête de 3 jours peut transporter 80 000 m³ ;
- côte du Bénin : 1 million à 1,5 millions de m³/an ;
- côte de la Manche : 50 000 m³/an ;
- nord du bassin d'Arcachon : 740 000 m³/an vers le Sud et 110 000 m³/an vers le Nord ;
- du Rhône à la Pointe de l'Espiguette : 100 000 m³/an mais quelques milliers de m³/an sur le littoral PACA.

2.1.3. Impact sur les ouvrages

Si un ouvrage de grandes dimensions est construit le long du littoral, le courant de houle viendra frapper l'ouvrage et sera dévié vers le large. Dans la zone de fort transport sédimentaire, c'est-à-dire à proximité de la barre de déferlement, on aura une tendance à accumulation près de l'ouvrage. Par contre, au droit de l'impact, entre le courant de lévigation et l'ouvrage, il se produit une érosion qui s'étend ensuite vers le large : le courant étant « canalisé » entre les accumulations sédimentaires et le pied de l'ouvrage.

On peut estimer que si l'ouvrage s'étend jusqu'à des profondeurs importantes, il stoppera la totalité du transit littoral. Une fraction des sédiments s'accumulera le long de la côte en amont, sur une distance d'autant plus grande que la résultante des houles aura une obliquité faible par rapport à la ligne de rivage. L'autre partie sera déviée vers le large d'autant plus loin que les houles seront importantes et les sédiments plus fins.

Sur la face aval de l'ouvrage, l'absence d'apport va provoquer une érosion souvent importante, qui s'arrêtera lorsqu'un nouveau profil d'équilibre, compatible avec les caractéristiques de la houle sera obtenu. Les caractéristiques de cette érosion porteront sur un approfondissement des petits fonds et sur un recul du trait de côte, donc une nouvelle orientation du littoral permettant, à la limite, d'obtenir une résultante nulle des transits littoraux. On pourra noter également une accumulation de matériaux dans la zone d'ombre, due à la diffraction.

Les ouvrages qui sont les plus difficiles à dimensionner sont ceux qui sont implantés au voisinage de la barre, tels qu'un port de pêche ou de plaisance. De manière générale, de tels ouvrages vont former un écran étanche au transit littoral dans toute la zone s'étendant de la côte à des profondeurs de – 6 m où se trouve la barre. Les sédiments qui cheminent en temps ordinaire dans cette zone vont être déviés vers le large, venant augmenter le débit solide dans la barre et par conséquent

produire un dépôt, pouvant gêner l'accès aux installations portuaires et imposant un dragage. Si le transit est important, il devient même impossible de draguer les dépôts : il faut alors agir en diminuant le coefficient de réflexion de l'ouvrage ou les apports de sédiments (par la construction d'un épi par exemple).

2.2. Représentation de la dynamique sédimentaire

Les quelques considérations précédentes et très générales sur le transport sédimentaire et son impact sur le trait de côte nous amènent à insister sur l'action prépondérante de la houle dans les mers à faible marée comme la Méditerranée. La houle vient par ailleurs se superposer aux courants généraux de marée sur les côtes océaniques. Pour pouvoir aborder ces phénomènes par une modélisation, nous présentons une approche par processus, traités indépendamment (houle, courant, transport de sédiments, évolution des fonds), en prenant en compte leurs interactions puis en concevant des procédures d'évolution temporelle permettant de les enclencher.

Les courants exercent sur le fond des contraintes de cisaillement qui mettent les sédiments en mouvement, se superposant à l'action de « piston » des houles qui mettent les sédiments en suspension. Les sédiments sont transportés, soit par charriage sur le fond, soit en suspension sur toute ou partie de la colonne liquide. En fonction des conditions hydrodynamiques locales, ils peuvent soit se déposer, soit produire par leur arrachement, une érosion du fond.

Deux types de transport de sédiment sont prédominants dans l'eau : le charriage et la suspension.

Le charriage correspond au déplacement des grains de sable par roulement sur le fond ou par saltation dus aux forces tractrices exercées par le courant sur les particules.

La suspension nécessite des forces plus importantes. Les grains de sable sont soulevés, entraînés par des courants turbulents et se déplacent alors dans la masse de l'écoulement. La distance de ce transport peut être importante.

La morphodynamique littorale est la résultante de l'interaction de tous ces processus :

- la houle crée des contraintes internes dans la masse d'eau, qui mettent les sédiments en suspension et génèrent des courants de houle ;
- les courants créent des contraintes de cisaillement sur le fond qui mettent en mouvement et transportent les sédiments ;
- les sédiments transportés se détachent des fonds ou se déposent, entraînant des modifications de la bathymétrie ;
- les évolutions bathymétriques modifient les houles et les courants ;
- et la boucle continue...

L'ensemble de ces phénomènes crée beaucoup de non-linéarités qu'il s'agit de prendre en compte pour être en mesure de simuler les évolutions morphodynamiques d'un site.

3. Approche mathématique

3.1. *Echelles de temps et d'espace des modèles – limitation de la présentation*

La morphodynamique côtière est avant tout une science empirique. Elle est le résultat de nombreuses observations en nature et d'expérimentations en laboratoire qui ont abouti à la quantification de formules empiriques qui permettent aux ingénieurs d'estimer des quantités de sable transportées, des vitesses de déplacement, des évolutions du trait de côte à moyen et long terme. Le pragmatisme des Américains a été à l'origine de nombreuses expérimentations en nature, de quantifications qui ont été rassemblées dans le Shore Protection Manual (CERC 1984), qui est utilisé dans le monde entier, souvent de manière inadaptée, étant donné les situations différentes que l'on peut rencontrer sur notre planète. En France, quelques ouvrages davantage adaptés aux spécificités de nos côtes sont cependant disponibles (Catalogue sédimentaire 1984), (Migniot 1985). Nous renvoyons le lecteur à ces ouvrages pour plus de détails.

Les processus morphodynamiques sont par essence tridimensionnels. Cependant certains phénomènes produisent des effets unidimensionnels, par exemple suivant une direction de houle ou encore bidimensionnels suivant un profil pendant une tempête, ou encore bidimensionnel en plan à proximité des ouvrages. Ceci a conduit au développement de plusieurs gammes de modèles conceptuels (De Vriend *et al.*, 1993).

3.2. *Les échelles d'espace*

Quatre types de modèles travaillant à des échelles d'espace différentes peuvent être identifiés :

– les *modèles de trait de côte* qui décrivent, à partir d'une intégration selon le profil de côte, les évolutions sédimentaires suivant la direction longitudinale. On trouve dans cette catégorie des modèles 1D longitudinaux ;

– les *modèles de profil côtiers*, qui ignorent les variations longitudinales du profil de côte et qui ne s'intéressent qu'aux processus qui ont lieu dans le profil. Ce sont des modèles 2DV ;

– les modèles *surfiques ou 2DH*, basés sur une intégration dans la verticale des courants et qui prennent en compte les deux directions horizontales ;

– les *modèles 3D* qui intègrent les deux approches précédentes, soit par couplage, soit par résolution directe ;

– les *modèles locaux*, qui se concentrent sur les phénomènes de petites échelles (rides, dunes). Dans ce type de modèle, en général 1DV, la dimension verticale est primordiale.

3.3. Les échelles de temps

La plupart de ces modèles morphodynamiques consistent en couplage de modèles de processus, qui traitent les évolutions à trois échelles de temps différentes :

– les *modèles d'évolution initiale*, résultant d'une seule boucle de ces modèles et qui n'ont d'autre objectif que de déterminer les taux d'érosion et de sédimentation initiaux ;

– les *modèles d'évolution morphodynamique à moyen terme*, où les évolutions bathymétriques modifient les autres composantes : houles, courant, transport de sédiments. L'échelle de base de ces processus est celle de l'hydrodynamique (tempête, marée) ;

– les *modèles d'évolution à long terme*, pour lesquels les équations constitutives ne décrivent pas les processus pris individuellement ainsi que leurs interactions, mais doivent être intégrés sur une échelle de temps beaucoup plus longue.

3.4. Limitation de la présentation

Dans ce qui suit, nous allons limiter notre présentation aux modèles d'évolution morphodynamiques surfaciques (2DH) utilisables à court et moyen terme.

Type de modèle	Court terme	Moyen terme	Long terme
Trait de côte			X
Evolution des profils (2DV)	X		
Evolution surfacique (2DH)	X	X	
Evolutions intégrées (3D)	X		
Modèles locaux	X		

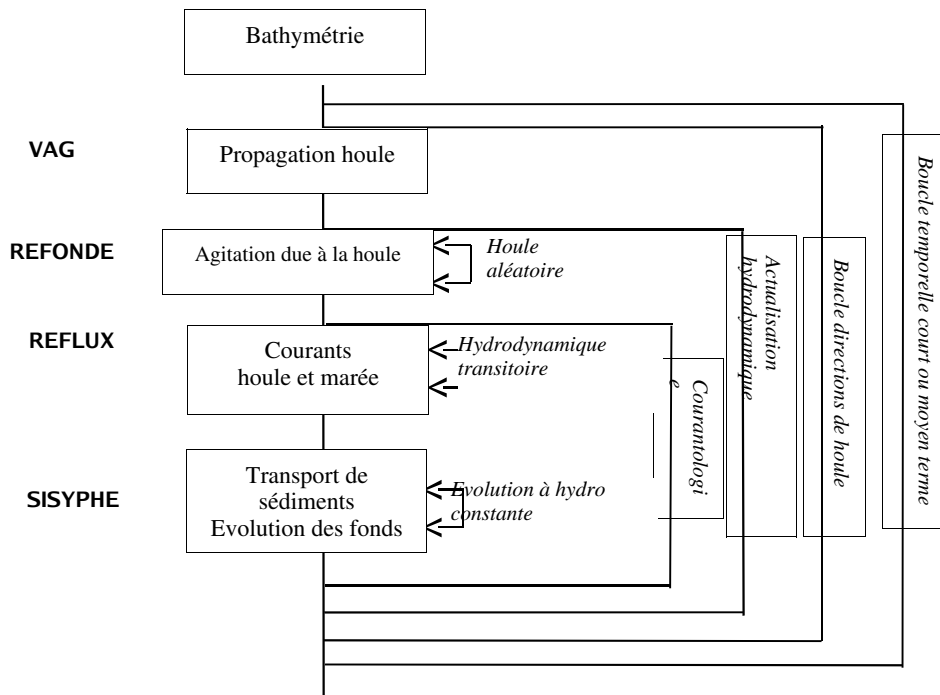
X = *domaine de validité des modèles* ombré = *abordé dans ce document*

Certains modèles que nous présentons ci-après ont été utilisés et améliorés par le CETMEF et l'université de Technologie de Compiègne dans le cadre du projet MAST-Morphodynamics qui regroupait 32 laboratoires européens. D'autres systèmes de modélisation sont bien entendu disponibles (De Vriend *et al.*, 1993), (Nicholson *et al.*, 1997), mais nous nous limiterons à la description du système disponible au CETMEF, qui est assez représentatif de ce type d'outils.

Cette famille de modèles et le système qui en résulte a été développée dans le but de répondre aux besoins des services maritimes, gestionnaires du domaine public maritime, qui souhaitent recourir à ce type d'outils de manière à simuler les répercussions d'ouvrages sur le littoral.

3.5. Les modèles morphodynamiques surfaciques (2DH)

La constitution d'un système de simulation morphodynamique susceptible de simuler sur le court et le moyen terme l'évolution de processus physiques ainsi que leurs interactions nécessite une description fine de chaque processus au moyen d'outils de modélisation adaptés ainsi que leur séquençement dans une boucle temporelle. L'algorithme ci-dessous illustre l'enclenchement des divers modules.



Nous décrivons ci-dessous de manière très succincte les codes de calcul mis en œuvre dans cette étude.

VAG : propagation de la houle au large vers la côte (Gomi 2000). Il s'agit d'un modèle unidimensionnel suivant une direction de propagation d'un front d'onde qui n'est dévié que par l'effet de la réfraction des fonds. Il permet donc de propager une houle monochromatique sur une grande distance. Il n'est pas utilisable à proximité immédiate de la côte, notamment en présence de hauts fonds très hétérogènes ou

d'ouvrages. Il présente cependant l'intérêt de fournir des conditions limites de bord imperméable pour englober un domaine à l'intérieur duquel un modèle plus sophistiqué sera utilisé, tel que REFONDE. VAG résout l'équation suivante :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad [1]$$

T la période (s), t le temps, L la longueur d'onde (m), $\omega = 2\pi / T$ la pulsation de la houle (rad/s), $k = 2\pi / L$ le nombre d'onde (rad/m), $C = \frac{\omega}{k}$: la célérité de l'onde (m/s), θ l'angle entre l'axe Ox et la direction d'une ligne de crête de direction n .

REFONDE : ce modèle est basé sur les équations bidimensionnelles de Berkhoff qu'il résout par la méthode des éléments finis (Cetmef – Refonde 2000). Il permet de simuler l'agitation de la houle à proximité des ouvrages en prenant en compte les phénomènes de réfraction des fonds, de diffraction et de réflexion des ouvrages.

La formulation de Berkhoff a été établie sous certaines conditions : le fluide est supposé parfait, de masse volumique constante. L'écoulement est supposé irrotationnel et la pression est non hydrostatique. C'est un modèle elliptique qui nécessite d'imposer des conditions limites sur la totalité du pourtour du domaine.

$$\overrightarrow{\text{grad}}(C C_g \overrightarrow{\text{grad}} \phi) = k^2 C C_g \phi - i \omega W \phi \quad [2]$$

où ϕ est le potentiel complexe, C la célérité de vague, C_g la célérité de groupe, k le nombre d'onde. Le terme de droite est un terme de dissipation résolu par itérations (W conditionne l'intensité de la dissipation). Les conditions limites mises en œuvre dans le modèle correspondent à divers types de parois et de conditions ouvertes :

– Conditions réfléchissantes : $\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik \cos \theta \frac{1 - Kr}{1 + Kr} \phi$

– Frontière ouverte en sortie $\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik \cos \theta \phi$

– Frontière ouverte en entrée $\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik \cos \theta_{inc} \phi_{inc} - \cos \theta_{sor} \phi_{inc} - ik \cos \theta_{sor} \phi_{sor}$

où θ_{inc} et θ_{sor} sont respectivement les angles que font les ondes incidentes et de sortie avec la normale à la paroi.

REFLUX : ce modèle est basé sur les équations bidimensionnelles de Saint-Venant (complétées par la prise en compte des contraintes de radiation de la houle),

qu'il résout par la méthode des éléments finis [6]. Il permet de calculer les distributions des champs de courant u_i et de niveau d'eau h et de profondeur H aussi bien en mer qu'en rivière, en prenant éventuellement en compte la marée. La formulation de Saint-Venant a été établie sous certaines conditions : profondeur d'eau faible par rapport aux dimensions horizontales, pression hydrostatique.

– Equation de continuité

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H u_j}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1, 2 \quad [3a]$$

– Equations de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{H} \frac{\partial H \tau_{ij}}{\partial x_j} + g \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\tau_{fi}}{H} + \frac{\tau_{si}}{H} + \frac{1}{H} \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad [3b]$$

i, j = 2

Où les différents termes sont associés à des processus physiques :

- accélération temporelle (terme 1) et convective (terme 2).
- Tenseur des contraintes visqueuses et turbulentes (terme 3).

Ce tenseur d'ordre 2 exprime les contraintes visqueuses et turbulentes présentes dans le fluide : $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} = 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ où ν est la viscosité cinématique de l'eau.

– Force de pression (terme 4).

– Force de frottement sur le fond (terme 5). C'est la force de frottement sur le fond qui équilibre la force de gravité dans un écoulement uniforme en rivière. En rivière, elle joue un rôle important ; elle s'exprime par une loi empirique :

$$\tau_{fi} = \rho g \frac{\sqrt{u_i^2} u_i}{C_h^2} \text{ pour Chézy ou } \tau_{fi} = \rho g \frac{n^2 \sqrt{u_i^2} u_i}{H^{1/3}} \text{ pour Manning où } \rho \text{ est}$$

la masse volumique de l'eau et C_h le coefficient de Chézy qui dépend de la nature et de l'état des fonds (rides, dunes, fond plat). Ce terme est une source importante de non-linéarité pour le système d'équations.

– Force de frottement en surface (terme 6) due au vent qui s'exprime par une loi empirique, fonction de la vitesse du vent \vec{w} , qui a pour expression

$\rho_{si} = r \rho_a \sqrt{w_i^2}$ où r dépend de l'état de la surface (rides, vagues, calme plat), ρ_a est la masse volumique de l'air.

– Contraintes de radiation de la houle (terme 7). Ce terme exprime l'effet déviateur des courants produits par la houle ainsi que la génération des courants de houle. Le tenseur des contraintes s'exprime par une relation du type :

$$S_{ij} = E \frac{C_g}{C} \frac{k_i k_j}{k^2} = E \frac{C_g}{C} \frac{1}{2} \delta_{ij} \quad \text{où } E \text{ est l'énergie de la houle (}$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_0^2 \text{) d'amplitude } H_0, C_g \text{ la célérité de groupe, } C \text{ la célérité des}$$

vagues et k_i, k_j le nombre d'onde. δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

– Force de Coriolis (terme 8). Ce terme d'inertie permet de prendre en compte l'effet déviateur des courants dû à la rotation de la terre. $f_i = 2 \Omega \sin \varphi \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ où Ω est la vitesse de rotation de la terre et φ la latitude du point considéré.

– Pression atmosphérique (terme 9).

– Conditions limites.

La résolution du système d'équations [3] nécessite de définir au préalable la nature et les caractéristiques des écoulements sur les frontières du domaine.

Pour les problèmes d'écoulement bidimensionnel horizontal à surface libre, les conditions aux limites sont généralement de type Dirichlet sur les frontières ouvertes.

$h(t)$ pour la marée ou une crue,

$u_n(t) = 0$ pour une surface imperméable (glissement) associée éventuellement à $u_t(t) = 0$ (adhérence complète),

$\tau_t = C_F |u_t| u_t$ pour une paroi rugueuse,

ou de type Cauchy-Neuman $q_n(t)$ pour un débit imposé en provenance d'un fleuve côtier ou d'un émissaire en mer.

Une combinaison de ces conditions limites peut être imposée sur les frontières, en respectant une certaine compatibilité.

SISYPHE : permet de calculer, à partir des champs de houle et de courant, le transport solide saturé de sédiments non cohésifs dans des domaines bidimensionnels ainsi que les évolutions des fonds qui en résultent (Tanguy *et al.*, 1994, Dhatt *et al.*, 1994, Le Normant *et al.*, 1998).

$$\frac{\partial Z_f}{\partial t} = \text{Div} q_s = 0 \quad [4]$$

où Z_f est la cote du fond, q_s en m^2/s transport solide volumique par unité de largeur tenant compte de la porosité. Ce modèle intègre une actualisation locale de l'hydrodynamique (débit constant au nœud).

Cette formule est donc associée à une formule de transport empirique. Nous présentons ici à titre d'exemple la formule de Bijker :

$$q_s = q_{sc} + q_{ss}$$

Le transport sous l'action combinée des courants et de la houle est modélisé dans Sisyphe à partir de la formule de Bijker (1968) qui comprend une partie de transport par charriage et une partie en suspension. Partie charriage :

$$q_{sc} = 5d \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho}} e^{0.27 \frac{\rho_s \rho g}{\rho_{cwe}}} \quad \text{avec:} \quad \rho_c = \left(\frac{C_h}{C_h'} \right)^{3/2}$$

$$\rho_{cwe} = \rho_c \rho_{cw}$$

$$\rho_{cw} = \rho_c \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho U_w}{V} \right) \quad \rho_c = 0.0575 C_h$$

$$\rho_c = \frac{\rho g V^2}{C_h^2} \quad U_w = \frac{H}{T \sinh 2\pi \frac{h}{L}}$$

où $\rho_c = \left(\frac{C_h}{C_h'} \right)^{3/2}$ est la part du frottement sur le fond qui participe au charriage

(rapport entre contrainte effective et contrainte totale), d est le diamètre du sédiment, ρ_c est la contrainte tangentielle due au courant, ρ_s et ρ les masses volumiques du sédiment et de l'eau, ρ_{cw} et ρ_{cwe} les contraintes effectives dues à l'ensemble houle + courant et celle du courant combinée à la houle, C_h et C_h' les coefficients de Chézy global et de peau, U_w l'amplitude de la vitesse orbitale de la houle près du fond, V la vitesse moyenne sur la verticale, H la hauteur de houle et h la hauteur d'eau, L la longueur d'onde et T la période.

Partie suspension saturée :

$$q_{ss} = 183 q_{sc} \ln \frac{33h}{k_s} I_2$$

$$I_1 = 0.216 \frac{k_r/k}{k_r/k} \frac{A^{0.1}}{k_r/k} \int \frac{1}{y} y^A dy \quad \text{et}$$

$$I_2 = 0.216 \frac{k_r/k}{k_r/k} \frac{A^{0.1}}{k_r/k} \int \frac{1}{y} y^A \ln y dy$$

avec : $A = \frac{W_s}{U_{*cw}}$ et $U_{*cw} = \frac{V\sqrt{g}}{C_h} \frac{1}{2} \frac{U_w^2}{V}^{\frac{1}{2}}$

où k_r est l'épaisseur de la couche de charriage, k_s le coefficient de Nikuradze, W_s la vitesse de chute des grains, κ la constante de Von Karman, U_{*cw} la vitesse de cisaillement sur le fond en houle + courant.

4. Modèles numériques

Les modèles numériques que nous avons utilisés dans le système de simulation morphodynamique sont de natures très diverses et nécessitent des procédures de couplage qui doivent respecter un certain nombre de contraintes :

Maillages spécifiques

- Maillage unidimensionnel suivant la direction de propagation pour VAG ;
- Maillage 2D avec une discrétisation suffisante par longueur d'onde (7 points minimum recommandés) à base de triangles à 3 nœuds pour REFONDE ;
- Maillage à base de triangles à 6 nœuds densifié autour des ouvrages pour REFLUX ;
- Maillage à base de triangles à 3 nœuds simplifié à partir du maillage hydrodynamique (un T3 pour chaque T6) pour SISYPHE.

Schémas de résolution

- Direct (sans dissipation) ou par itérations (avec dissipation) pour REFONDE ;
- Euler implicite pour REFLUX en conditions transitoires avec une résolution de type Newton-Raphson pour l'algorithme non linéaire ;
- De type prédicteur-correcteur pour le schéma semi-implicite de REFONDE.

Interpolations

- Des contraintes de radiation du maillage houle sur le maillage courant ;
- Des vitesse et niveau d'eau du module de courant sur le maillage transport ;
- Actualisation de la bathymétrie modifiée sur les maillages houle et courant.

Limitation du pas de temps

- Par le nombre de Courant pour le module de courant ;
- Par le critère de stabilité inhérent au schéma de résolution de SISYPHE ;
- Par l'enclenchement des modules temporels qui limitent les évolutions des fonds trop rapides ;
- Concomitance de modèles elliptique (agitation de la houle), hyperbolique (transport de sédiments) et mixte (parabolique /hyperbolique pour les courants).

Le nouveau système obtenu qui enclenche ces modèles est un système complexe, à part entière, qui mériterait une analyse poussée au-delà de celle portant sur chaque composante, ne serait-ce que pour déterminer si le problème global est bien posé et comment se propagent les informations à l'intérieur de ce système.

Les différents modèles qui composent ce système morphodynamique contiennent un grand nombre de singularités (dissipation, convection, rugosité, transport solide), pouvant conduire à de fortes instabilités et produisant la divergence de certains modules. Le système évolue alors de manière singulière, produisant des résultats aberrants ou devenant subitement instables après une longue période de stabilité.

Les problèmes apparaissent souvent au travers du modèle d'évolution des fonds qui est fortement hyperbolique et qui produit des instabilités par raidissement des formes des fonds. Or en nature, les fluctuations turbulentes et les angles de stabilité critiques des formes de fonds ont un effet de lissage qui peut être pris en compte dans les modèles par « un effet de pente » (Hamm *et al.*, 1994). Le réglage de ces termes est extrêmement délicat, puisque sous-estimés ils produisent un choc numérique faisant diverger le modèle et surestimés ils apportent de la diffusion lissant et faisant disparaître les formes de fonds.

5. Exemple d'application

Nous avons choisi d'illustrer les capacités des modèles sédimentologiques surfaciques par une étude d'évolution du tombolo de Faraman situé sur le delta du Rhône en Camargue, entre la pointe du Beauduc à l'ouest et l'embouchure du Grand Rhône à l'est (voir figure 1). Cette étude a été réalisée par le CETE Méditerranée dans le cadre du programme LITEAU (ministère chargé de l'Environnement). Le littoral camarguais subissant un net recul dans cette zone, une digue à la mer a été construite en 1972 sur presque toute la côte, coupant la communication entre les deux milieux, plage à l'avant et étangs et salins à l'arrière. Puis une trentaine d'épis ont été construits tout le long de la côte, entre 1986 et 1995. Un secteur entre deux

épis montrant un déficit inquiétant la CSMSE (Compagnie du Salin du Midi et des Salins de l'Est) a décidé l'implantation d'un brise-lames émergé à cet emplacement. Le brise-lames de Faraman a été construit en 1992, alors que la plage avait presque disparu. Aujourd'hui, une plage de sable fin est apparue entre le brise-lames, la côte et les épis.

Données de houle

Les données de houle sont fournies par une bouée directionnelle du CETMEF, située au sud-ouest du brise-lames (43°21' N, 04°34'E).

L'étude a consisté en une analyse de sensibilité aux paramètres, effectuée sur la tempête du 18 au 22 septembre 2000 (pour laquelle les données bathymétriques avant-après existent. Cette tempête fut caractérisée par 3 climats de houles successifs avec concomitance de surcotes marines : une forte houle de sud-est (135°), une relative accalmie par houle de secteur sud (185,5°) et un deuxième pic de houle de secteur sud-ouest (247°).

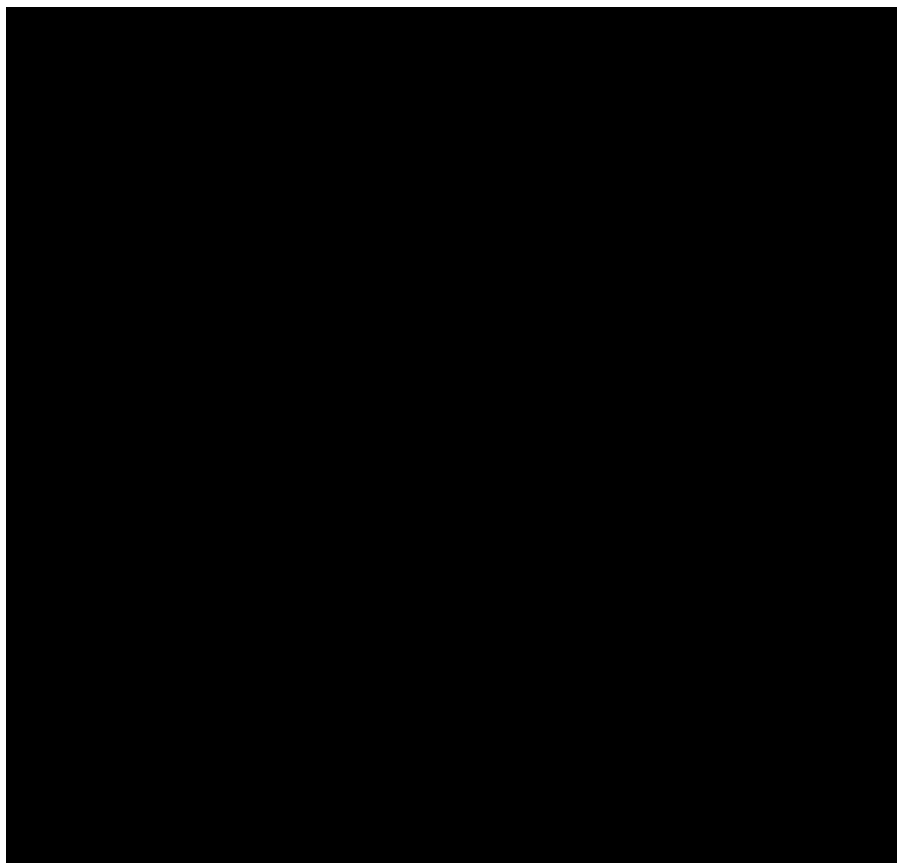


Figure 1. *Localisation du brise-lames de Faraman en Camargue*



Figure 2. *Vue aérienne du brise-lames (1992). (Courtoisie du Service Maritime des Bouches du Rhône)*

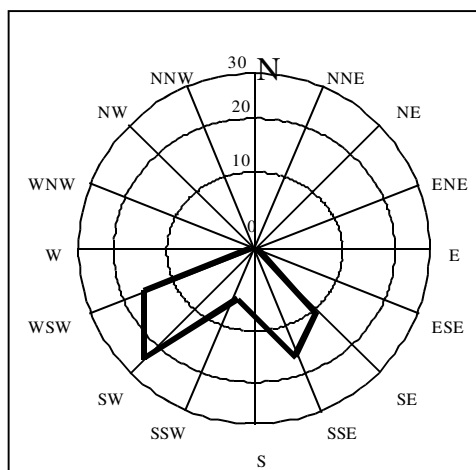


Figure 3. *Fréquence (en % du total annuel) des directions de houle observées à Cap Couronne (1964-1978) d'après Météo France*

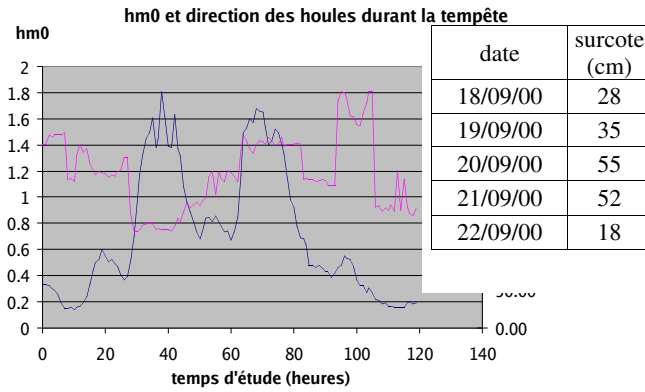


Figure 4. Graphique des hauteurs significatives et directions de houle et tableau des surcotes pendant la tempête

La bathymétrie

La bathymétrie de la côte est régulière avec une plage rectiligne et des variations de profondeur relativement régulières. Il faut noter la présence d'une barre de déferlement à 200 mètres de la côte environ.

On peut aussi remarquer la tache plus claire autour de l'extrémité est du brise-lames, qui correspond à un creusement souvent observé en extrémité de brise-lames, façonné par les houles de beau temps.

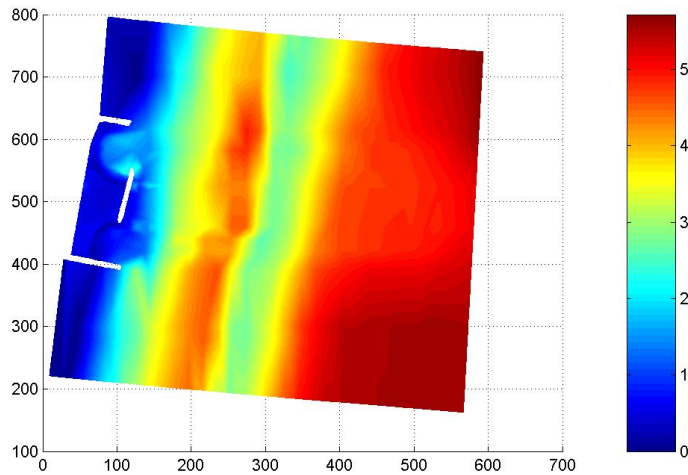


Figure 5. Bathymétrie des fonds avant tempête (en m)

Les paramètres de modélisation

Les paramètres ont été fixés en se basant sur les résultats des études précédentes (Tanguy, 1994 ; 1997), (Michel, 2000), (Mignot, 2000 ; 2001), (Jouan, 2002) et les données réelles. Le diamètre moyen des grains est de 0,18 mm, valeur la plus adaptée à la réalité, et la modélisation est conduite en houle aléatoire. Le spectre de houle est fixé à 10 périodes réparties entre les deux houles extrêmes des données sur chaque période considérée. Les calculs des courants prennent en compte la surcote, ce qui, ajouté à l'effet de set-up dû à la houle, assure une immersion totale du tombolo. Les données du cas de référence sont les suivantes :

Direction de la houle	Sud-Est (SE)	Sud (S)	Sud-Ouest (SW)
Période de pic	5,6 s	6,3 s	5,7 s
Direction / Nord	135°	185,5°	247°
Largeur du spectre	10 périodes de 3,2 à 6,2 s	10 périodes de 5,9 à 7,7 s	10 périodes de 4,6 à 6,7 s
Hauteur significative	1,5 m	0,81 m	1,52
Durée du climat de houle	13 heures	18 heures	13 heures

Les domaines étudiés sont encadrés par deux orthogonales délimitées par VAG.

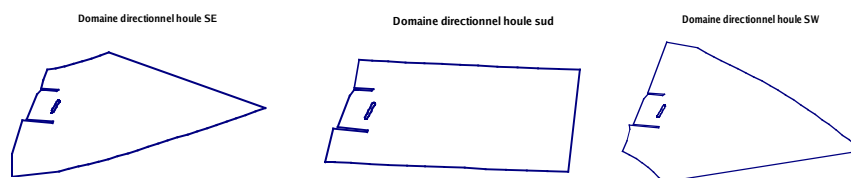


Figure 6. Délimitation des 3 domaines de houles par des orthogonales de VAG

Pour chaque direction :

- REFLUX est utilisé en conditions stationnaires ;
- pas de temps de Sisyphe : 60s ;
- conditions aux limites pour la houle : front d'onde ouvert en entrée, orthogonales ouvertes en sortie, plage, épis et brise-lames totalement absorbants ;
- conditions aux limites pour les courants : tous les bords ouverts sauf la côte et le brise-lames fermés.

Au terme des constatations faites sur la comparaison du cas réel avec le cas de référence, et de l'étude de comportement de la boucle face aux paramètres, l'importance variable des divers paramètres a été mise en évidence.

En effet, alors que la viscosité et la largeur du spectre ont une grande influence, les valeurs de réflexion du brise-lames ou de la plage ont des influences plus limitées.

- le pas d'actualisation du calcul Refonde-Reflux est fixé à une heure. Les résultats du calcul en seront plus précis et plus réalistes. Par ailleurs, c'est le seul paramètre permettant d'obtenir une esquisse du dépôt au tombolo côté est, dépôt important dans le cas réel ;

- le spectre des périodes est un spectre large ;

- le coefficient de réflexion à l'avant du brise-lames sera pris égal à 0,5. Ce coefficient a une faible influence, augmentant légèrement les dépôts ;

- la viscosité a été fixée à 20 m²/s derrière le brise-lames et à 40 m²/s sur le reste du domaine ;

- la valeur moyenne des vents réels mesurés est de 14 m/s, avec une direction moyenne d'origine au 140 (mesure d'angle par rapport au nord, dans le sens horaire) ;

- les petites houles (<1,5 m) ayant suivi la tempête, durant les 40 heures entre la fin des hautes vagues et la prise de mesure, sont également modélisées... ;

- les conditions aux limites imposées pour SISYPHE sont les fonds imposés fixes aux limites.

Résultats de la simulation

Les résultats font état d'une nette augmentation des volumes mis en jeu : la variation maximale de hauteur est de 1,80 m, pour une variation maximale réelle de 1,85 m.

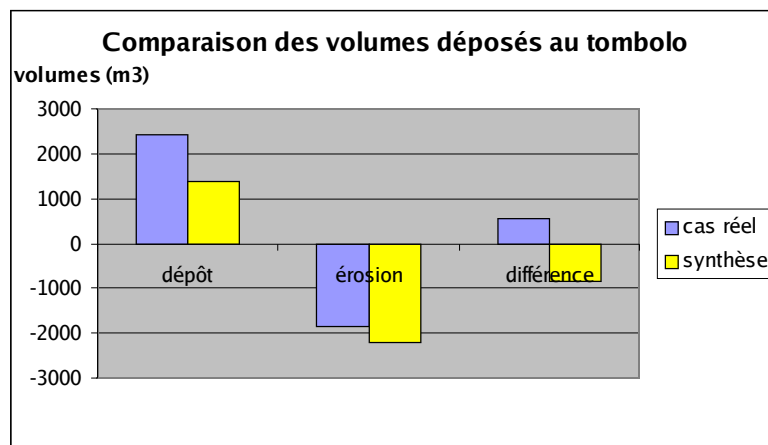


Figure 7. Comparaison graphique des volumes déposés au tombolo

La figure 7 montre un rapport de 1 à 1,8 pour le dépôt au tombolo, entre la modélisation et le cas réel, le meilleur résultat obtenu.

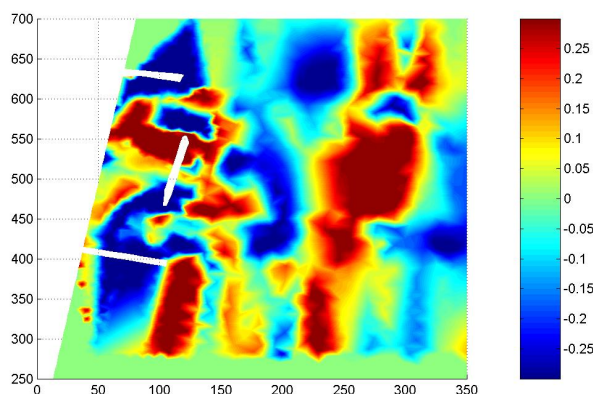
Qualitativement, on retrouve l'avancée de la barre, plus régulière que le cas réel. Le dépôt en pointe de l'épi ouest semble réaliste, et pour le tombolo, le côté ouest est bien représenté, avec une érosion et un dépôt sur l'arrière. Le côté est laissé quant à lui apparaître un dépôt, très proche de la réalité. Le fait d'avoir pris en compte le vent de SE, accentue le set up et en conséquence le dépôt de sédiments, perpendiculairement au bord est du tombolo.

Les résultats sont donc globalement assez représentatifs de la réalité. Cependant, la modélisation montre une forte érosion en face du brise-lames, côté mer, et élargit la zone de dépôt entre la barre et la côte. C'est une tendance inversée par rapport aux résultats du cas réel. La zone de dépôt meuble semble décalée vers le large par la modélisation. Ceci est certainement dû au critère de déferlement de Miche modifié qui a été utilisé.

Qualitativement, on obtient une distribution spatiale des dépôts-érosion assez proche de la réalité.

Déjà utilisés indépendamment les uns des autres, ces modèles nécessitent en effet d'être testés dans un enchaînement, par comparaison avec un cas réel.

En se plaçant en tant que validation de la chaîne de simulation morphodynamique littorale, cette étude démontre tout l'intérêt que revêt cet outil d'aide à la décision, même s'il doit être utilisé avec beaucoup de précautions et, pour l'instant, de manière plutôt qualitative, lorsque les données sont disponibles en nature.



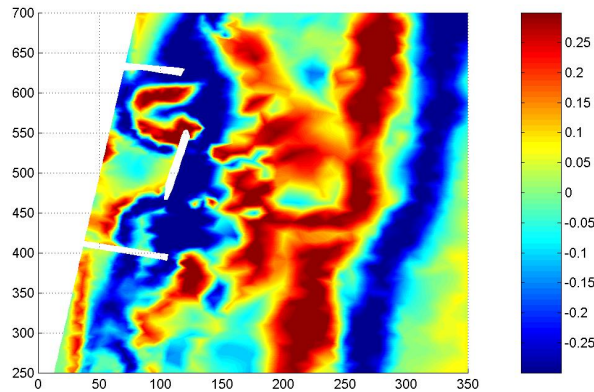


Figure 8. *Comparaison spatiale réalité-synthèse des mouvements (échelle en m)*

6. Perspectives

Des avancées importantes ont été réalisées cette dernière décennie sur la compréhension des phénomènes physiques, sur les techniques de modélisation, grâce en partie aux initiatives nationales (programme de recherche LITEAU du ministère de l'Environnement) et européennes (programmes MAST). De même, les capacités de traitement des matériels informatiques, aussi bien les puissances de calcul que les affichages graphiques, rendent maintenant envisageables des études de cas réels comme celui qui a été présenté ci-dessus.

Cependant, l'utilisation pratique de tels modèles pose encore de sérieux problèmes et des recherches sont en cours sur de nombreux thèmes. Nous donnons ci-après quelques pistes d'amélioration portant soit sur les modèles eux-mêmes, soit sur leur couplage, soit encore sur les approches concernant le long terme.

6.1. Amélioration des conditions aux limites

Les deux modèles qui posent des problèmes aux limites sont les deux modèles hydrodynamiques : houle et courant.

- Le modèle de houle est un modèle elliptique, qui réagit à la moindre perturbation provenant de l'intérieur du domaine. La présence des ouvrages génère des réflexions qui se propagent jusqu'aux limites et provoquent des artefacts numériques. Ceux-ci génèrent à leur tour des courants perturbateurs aux limites.

Pour limiter la production de ces artefacts, nous avons utilisé le logiciel de propagation-réfraction de la houle VAG en générant des orthogonales assez loin des ouvrages jusqu'au trait de côte sans prendre en compte les ouvrages. Ces deux « orthogonales limites » constituent les frontières du domaine du code d'agitation

REFONDE. Or celui-ci prend en compte les ouvrages qui génèrent des ondes parasites. Celles-ci perturbent les conditions aux limites qui ne sont alors plus des conditions de symétrie. Bien que les perturbations subsistent, elles sont de moins grande ampleur que si nous avions utilisé un domaine fixe.

– Le modèle de courant possède 3 frontières ouvertes, dont deux sont des frontières latérales qui correspondent aux « orthogonales limites ». Or les conditions aux limites sur ces deux frontières ne peuvent pas être approchées par des conditions de niveau ou de débit imposé. En effet, le long d'une orthogonale limite, il se produit une élévation du plan d'eau due au set-up de la houle qui ne peut actuellement pas être prise en compte.

Pour pallier ces difficultés, nous proposons deux directions de recherche :

– une première amélioration pourrait consister à développer une solution analytique de cet effet de set-up et l'imposer le long de ces deux limites latérales du modèle de courant ;

– une autre possibilité serait d'utiliser une procédure itérative reportant un profil interne au domaine suffisamment éloigné des limites et des ouvrages pour ne pas être trop influencé, de le reporter en le translatant jusqu'à la limite la plus proche. Au bout de quelques itérations, la convergence devrait être assurée vers un profil de fond en équilibre avec les conditions stabilisées de houle et de courant.

6.2. Utilisation de modèles hydrodynamiques plus performants

Les modèles présentés précédemment ont été conçus pour reproduire les processus physiques plutôt en zone ouverte. Les estrans ou encore les hauts de plage, soumis au couvrement et au découvrement des bancs de sables et sur lesquels se produit le déferlement des vagues ne sont pas modélisés de manière précise. Pour le champ de houle par exemple, les critères empiriques de type Miche ou Goda qui écrêtent les vagues déferlantes et calculent ensuite les contraintes de radiation puis les courants ne représentent pas les processus de flux et de reflux sur le haut de plage. Une amélioration de la modélisation dans cette zone est donc nécessaire.

Comme l'indique Latteux dans (Le Normant, 1998), deux modèles sont principalement utilisés dans la zone de surf et de swash. Ces modèles sont de type Saint-Venant comme REFLUX 2D ou de Boussinesq comme peut l'être REFLUX 3D.

– Les modèles de Saint-Venant, dits « en eaux peu profondes » correspondent à des valeurs du paramètre de dispersion $\sigma \approx kh_0$ (avec k le nombre d'onde et h_0 la profondeur d'eau) proche de l'unité et des valeurs du paramètre $\sigma \approx a/h_0$ (avec a l'amplitude de l'onde) également proches de l'unité. Ce modèle est tout particulièrement approprié à la modélisation du run-up dans la zone de swash. Ces modèles intégrés dans la verticale ne prennent pas en compte les courants de retour

ou courants dans le profil qui ont un effet important en matière de transport de sédiments.

– *Les modèles de Boussinesq* sont des modèles plus élaborés puisqu'ils permettent de reproduire les principaux phénomènes liés à la propagation de la houle sur petits fonds. Les équations de Boussinesq correspondent à des plages de valeurs : $\frac{h}{L} \ll 1$ et tel que $\frac{h}{L^2} \ll O(1)$. Ils prennent également en compte la transformation non linéaire des trains d'onde en incluant les interactions non linéaires entre composantes et entre houle et courant ainsi que la propagation des ondes longues qui leur sont reliées. Par rapport au modèle de Saint-Venant, les modèles de Boussinesq présentent l'avantage d'inclure de la dispersion en fréquence et peuvent être appliqués à un spectre de houle plus large et à une partie plus étendue de la zone côtière. Comme le souligne B. Latteux (Le Normant, 1998), les équations de Boussinesq ne conduisent pas systématiquement au déferlement pour les faibles profondeurs d'eau (à cause de la dispersion en fréquence) alors que c'est le cas avec les équations en eaux peu profondes. Il faut donc inclure un critère de déferlement et une modélisation de la dissipation d'énergie pour modéliser la zone de surf.

Un progrès qui pourrait s'avérer riche en retombées est l'utilisation de modèles 3D ou de modèles quasi-3D. Les modèles quasi-3D à pression hydrostatique ou non sont de plus en plus courants mais nécessitent encore des capacités de calculs importantes. Avant de pouvoir utiliser des vrais 3D dans des cas naturels, on pourra chercher à les simplifier, dans la dimension verticale par exemple, comme c'est le cas du modèle REFLUX 3D qui utilise une représentation des variables sur la verticale par des bases de fonctions de différents types dépendant du ou des processus prédominants que l'on souhaite modéliser. Ces modèles nécessitent ensuite d'être complétés par des approches empiriques pour prendre en compte le déferlement par exemple. Cependant, la prise en compte des recirculations verticales comme le courant de retour en haut de plage permettra de simuler avec les modèles de transport adaptés, les évolutions « cross-shore » et « long shore » des plages.

L'intérêt qui est en même temps un inconvénient de conserver ces deux derniers types de modèle est qu'ils intègrent totalement tout ce qui touche aux houles et aux courants. Point n'est besoin de coupler un modèle de houle avec un modèle de courant par des contraintes de radiation comme c'est le cas pour le modèle de Saint-Venant et du modèle de Berkhoff. L'inconvénient est qu'il faut discrétiser finement les signaux d'entrée, c'est-à-dire l'état de la mer dans son intégralité par une variation de niveau : $h(t)$.

Nous recommandons donc de poursuivre les efforts en vue de développer, compléter et tester sur des cas de validation tant en laboratoire qu'en nature, le modèle REFLUX 3D. Ces améliorations pourraient porter sur le plan algorithmique de manière à optimiser la résolution. Il faudra également compléter ce code par davantage de physique.

Au niveau sédimentaire, la zone de swash est le siège de plusieurs types de transport de sédiment : les vagues, les courants, le transport par des vagues

semblables à des mini-mascarets qui avancent en eau peu profonde puis se retirent. C'est dans la zone de swash et dans la zone de déferlement que les transports de sédiments sont les plus importants. Seule une modélisation plus poussée permettra de représenter finement ces phénomènes.

6.3. Modèles de perturbation des fonds

En général, le transport de sédiment a pour effet de lisser le trait de côte. Si ceci est vrai pour les houles à faible obliquité, il n'est pas de même lorsque l'incidence augmente. Dans ce cas, de petites perturbations apparaissent créant des instabilités à l'origine de formes de fonds périodiques et par voie de conséquence d'irrégularités dans le trait de côte. De nombreuses observations et mesures ont été réalisées sur les littoraux. Elles mettent en évidence des formes de fonds périodiques et de grandes dimensions : baïnes et croissants en Atlantique ou en Méditerranée. Ashton (Ashton *et al.*, 2000) indique même que les mécanismes d'instabilité pourraient être à l'origine de formes qui s'étaleraient sur des centaines de kilomètres et perdurer sur de très longues périodes (le millénaire).

Pour essayer de reproduire ces évolutions, on a vu apparaître ces dernières années des modèles de perturbation (Falquiès *et al.*, 1996) utilisant l'analyse de stabilité linéaire, qui sont capables de générer des formes périodiques, y compris les barres de déferlement. Charge aux modèles de Saint-Venant ou de Boussinesq de les faire vivre et évoluer (Camenen *et al.*, 2002). Ce type de modèle est fort intéressant lorsque l'on s'interroge sur l'évolution à long terme du trait de côte.

6.4. Modélisation sédimentologique à long terme

La simulation morphodynamique par recours aux modèles numériques, comme le souligne fort justement H.J. de Vriend (De Vriend *et al.*, 1993) est encore à ses premiers balbutiements. Il insiste sur le fait que même si les capacités informatiques étaient actuellement disponibles pour utiliser des modèles morphodynamiques de processus dans un couplage à long terme, il n'est pas évident que l'on obtiendrait de bons résultats. Les processus qui sont négligeables à court et moyen termes peuvent avoir des effets majeurs à long terme. D'un autre côté, il n'est pas certain qu'une boucle enclenchant des modèles non linéaires n'ait qu'une solution unique : il peut y avoir un espace de solutions qui peuvent conduire à des états vraiment éloignés les uns des autres, atteints par des bifurcations non prédictibles. Ceci a déjà été démontré dans d'autres domaines de la dynamique des fluides, comme la météorologie ou l'océanographie. Non loin de la dynamique littorale, la dynamique fluviale avec les méandres de rivières l'illustre de manière criante.

De Vriend propose de procéder à une nécessaire réduction des informations :

– réduction des entrées, basée sur l'idée que nous pouvons décrire les effets à long terme à partir de la description à petites échelles à partir du moment où l'on est capable de trouver les processus représentatifs. Nous trouvons dans cette catégorie les méthodes de filtrage de la marée développées par Latteux et repris dans (De Vriend, 1993), des houles (Steijn, 1992) et concomitance de ces deux processus ;

– réduction des modèles en utilisant des modèles intégrés aux échelles pertinentes sans continuer à utiliser des modèles à petites échelles ;

– modélisation comportementale qui tente de décrire les phénomènes sans rentrer dans une description de détails des processus.

Certaines de ces méthodes mériteraient de faire l'objet de recherches car c'est vraiment sur le long terme que les simulations sont attendues. Les nouvelles approches qui mettent en perspective le développement durable permettront d'éviter les erreurs du passé qui n'ont considéré souvent que le court terme.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le ministère de l'Ecologie et du Développement durable qui a rendu possibles ces recherches menées dans le cadre du programme LITEAU, ainsi que le CETMEF qui a soutenu la poursuite des études.

7. Bibliographie

Ashton A., Murray A.B., Arnault O., "Formation of Coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves", *Nature*, Vol. 414, N°6861, p. 296-300, 2001.

Camenen B., Larroude Ph., « Un modèle morphodynamique côtier pour la création de barres rythmiques », *VII^e Journées nationales Génie Côtier, Génie Civil*, Anglet, 15-17 mai 2002.

Catalogues sédimentologiques des côtes françaises, collection de la DER d'EDF, Editions Eyrolles, 1984.

CETMEF, REFLUX v4.0 : Manuel théorique, 2000.

CETMEF, REFONDE: Manuel théorique, 2000.

CERC, Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, 1984.

CETMEF, Projet d'aménagement d'un poste roulier dans le port de Boulogne, 2001.

CETMEF, La Rochelle – port de La Pallice – Etude de la houle, février 2001.

De Vriend H.J., Capobianco M., Chesher T., De Swart H.E., Latteux B., Stive M.J.F., "Approaches to long term modelling of coastal morphology : a review", *Coastal Engineering*, vol.21, 1993, p. 225-269.

- De Vriend H.J., Zyserman J., Nicholson J., Roelvink J.A., Péchon P., Southgate H.N., "Medium-term 2DH coastal area modelling", *Coastal Engineering*, vol.21, 1993, p. 193-224.
- Dhatt G., Tanguy J.M., Peltier E., Zhang B.N., « Modélisation de l'évolution des fonds mobiles en mer et en rivière par éléments finis », *Revue Européenne des Eléments Finis*, Vol. 3, n°3/1994, p. 339-361.
- Dingemans M.W., Radder A.C., De Vriend H.J., "Computation of the driving forces of wave induced currents", in *Coastal engineering* 11, 1987, p. 539-563.
- Falquies A., Montoto A., Iranzo V., "Bed-flow instability of the long shore current", *Cont. Shelf Res.*, 16: 1927-1964, 1996.
- Frenette R., Dhatt G., Tanguy J.M., "A three dimensional finite element sediment transport model", *5th International Symposium on River Sedimentation*, Karlsruhe, Germany, avril 1992.
- Gaillard Pierre, "Numerical modelling of wave-induced currents in the presence of coastal structures", SOGREAH. In *Coastal Engineering*, 12, 1, 1988. p. 63-81.
- Gomi P., Notice théorique du code de calcul de VAG, Notice CETMEF, juin 2000, 15 p.
- Hamm L., Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement, Mémoire de thèse, Université J. Fournier, Grenoble, 1995.
- Hamm L., Tanguy J.M., Zhang B.N., « Prise en compte des effets gravitaires dans la modélisation du transport solide par charriage » *La Houille Blanche*, n° 4, 1994, p. 47-55.
- Horikawa Kiyoshi, Near shore dynamics and coastal processes, University of Tokyo press, 1998. 283 p.
- Jouan A., Protection du littoral : la modélisation, outil d'aide à la décision, TFE ENTPE, 2002, 50 p.
- Le Normant C., Latteux B., Etablissement d'un programme de développement sur les processus sédimentaires à l'interface terre-mer, rapport HE-42/98/044/B du LNHE, 1998.
- Levoy F., Evolution et fonctionnement hydrosédimentaires des plages macrotidales : l'exemple de la côte ouest du Cotentin, Thèse Université de Caen, 1994.
- Michel Cyril, Validation d'un système de simulation en morphodynamique littorale, DEA MMGE, Université Joseph Fourier Grenoble, CETE Méditerranée, septembre 2000. 50 p.
- Mignot Emmanuel, Validation d'un système de simulation en morphodynamique littorale, UTC, septembre 2001. 70 p.
- Mignot E. , Tanguy J.M., Pons F., « Modélisation morphodynamique des fonds autour des brises-lames », *V^e Journées Nationales de Génie Côtier*, Caen, 17-19 mai 2000.
- Migniot C., Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral, document SOGREAH – LCHF CETMEF, n° 51078, 1985.
- Nicholson J., Broker I., Roelvink J.A., Price D., Tanguy J.M., Moreno L., "Intercomparison of coastal area morphodynamic models", in *Coastal Engineering* 31, 1997, p. 97-123.

- Sabatier F., Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône, Thèse, Université Aix-Marseille III, 2001, 272 p.
- Steijn R.C., Input filtering techniques for complex morphological models, Delft Hydraulics, Rept. 824.53, 1992.
- Tanguy J.M., « De nouveaux outils numériques pour approcher la morphodynamique littorale », Bordomer, Bordeaux, 10/97.
- Tanguy J.M., « Evolution des techniques de modélisation numérique applicables aux zones littorales », *24^e Journées de l'Hydraulique*, Congrès SHF, Paris, sept. 1996, p 477-486.
- Tanguy J.M., « SISYPHE : un système logiciel français d'évolution morphodynamique en mer et en rivière », *Contribution nat. au 28^e congrès AIPCN*, Séville Espagne, mai 1994.
- Tanguy J.M., « Vers une approche "High Tech" du littoral », *Journées nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Dinard, avril 1995.
- Tanguy J.M., Rouas G., "Couplage de codes numériques dans le domaine de la morphodynamique", *Symposium Saint-Venant*, ENPC Paris, août 1997.
- Tanguy J.M., Zhang B.N., "A finite element morphological model applied to river bed evolution", *6th Intern. Symposium on River Sedimentation*, New-Delhi, India, nov. 1995.
- Tanguy J.M., Zhang B.N., "Morphological modelling of the evolution of a breach connecting a lagoon to the sea at Keta - Ghana", *Waves 94*, Vancouver, Canada, août 94.
- Tanguy J.M., Zhang B.N., Hamm L., "A new Lax-Wendroff algorithm to solve the bed continuity equation", *3rd International Estuarine and Coastal Modelling Conference*, Chicago, USA, 09/1993.