



## Chaîne d'outils intégrés permettant la modélisation de l'évolution d'un profil de plages sur le site du Rousty

K. Meftah<sup>a</sup>, F. Pons<sup>c</sup>, P. Gomi<sup>b</sup>, F. Sabatier<sup>d</sup>, P. Sergent<sup>b</sup>

<sup>a</sup>, UTC, 66 Avenue. de Landshut, 60200 Compiègne

<sup>b</sup>, CETMEF, 2 Bd. Gambetta, B.P. 60039 Compiègne Cedex

<sup>c</sup>, CETE Méditerranée, B.P. 37000, 13791 Aix-en-Provence Cedex 3

<sup>d</sup>, CEREGE, Europôle de l'Arbois, B.P. 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 04

### Résumé

Une campagne de mesures in-situ sur une année complète et pour un profil transversal émergé et immergé du littoral de Camargue a permis de mettre en place une base de données très utile pour une modélisation numérique de la morphodynamique de ce site. Parallèlement à des relevés topographiques réguliers pendant une année complète, de nombreux autres paramètres physiques ont été mesurés sur cette même période. Ils permettent de mettre en relation les différents phénomènes sédimentaires avec les phénomènes hydrauliques associés, notamment en période de tempête. Dans le cadre du projet «Liteau: Conception d'un outil de gestion des plages sableuses», un outil intégré modélisant plusieurs phénomènes physiques (houle, courant, vent, transport sédimentaire) est mis au point en utilisant pour le calibrer les données physiques relevées pendant cette année de mesures.

### Abstract

Field measurements have been carried out for a whole year on a cross-shore submerged profile of a Camargue beach and this allowed to build a useful data-base for numerical modelling of this site. Regular topographic measurements but also several other physical parameters have been recorded at the same time which allows to put in relation the various sediment phenomena with the various associated hydraulic parameters notably in period of storm. Within the French project "Liteau: Conception of management tool for sandy beaches", an integrated tool has been carried out to model combined effects of several physical phenomena such as waves, currents, winds, sediment transport. This tool will be calibrated and validated using physical measurements collected during this year of measurements.

### 1.Introduction

Actuellement, l'ensemble des processus physiques se déroulant sur le littoral n'est pas maîtrisé et encore moins leurs interactions. On a tendance à considérer isolément l'une ou l'autre des parties (zone immergée ou dunes) sans prendre en compte les transferts de sable entre celles-ci. Ceci est vrai aussi bien à court terme (durée d'une tempête), à l'échelle de temps de la saison (où l'on observe le recul des plages en hiver et leur reconstitution en été) ou de l'année.

Le site du Rousty dans le delta du Rhône a été instrumenté et suivi régulièrement pendant un an (<sup>1</sup>Sabatier 2001). Ce suivi a consisté essentiellement en des relevés topographiques et bathymétriques toutes les deux semaines couplés avec des mesures de flux sédimentaires dans la zone du déferlement (par des pièges de type Kraus) et sur la plage émergée (par des pièges de type Leatherman) et également avec des mesures d'hydrodynamiques marines (fournies

par un courantomètre de type AS4) et des mesures de vitesses de vents (avec des stations météorologiques portables DAVIS).

Le site du Rousty a été retenu comme site d'étude de ce projet car il présente les avantages d'être très peu anthropisé et de présenter une orientation perpendiculaire aux flux éoliens et marins dominants ce qui permet de simplifier la modélisation du site en ne modélisant qu'un profil.

Le projet Liteau se propose de concevoir un système d'aide à la décision pour traiter l'évolution du trait de côte qui sera validé entre autre sur ce site du Rousty. Cet article présente une chaîne d'outils intégrés dont le but est de modéliser l'évolution d'un profil de plage soumis à l'action hydraulique pour sa partie submergée et à une action éolienne pour le haut de plage et la dune. Il présente également le procédé qui a été utilisé pour fournir les conditions aux limites de houle en entrée de ce modèle en nous servant des données de houle fournies par une bouée se trouvant au large du site d'étude et en les propageant jusqu'à la frontière d'entrée du modèle en utilisant le logiciel SWAN.

## **2.Modélisation du transport éolien de la partie émergée**

Cette étude (<sup>2</sup>Pons, 2001) a commencé par une recherche bibliographique permettant de référencer les lois de transport éolien les plus courantes et de mieux appréhender une multitude de formulations empiriques caractérisées par de nombreux paramètres et qui ne sont la plupart du temps validées que sur le site sur lequel elles ont été établies. Un modèle numérique 2DV (1D pour le module transport de sédiments) aux éléments finis a été développé sur la base d'un schéma numérique de type Lax-Wendroff couplé avec le traitement de l'effet de pente sous plusieurs formes (effets de pente gravitaire, écroulements).

On a ensuite fait subir à ce modèle une analyse de sensibilité en fonction de différents schémas numériques, de différents traitements pour l'effet de pente, des différentes lois de transports choisis et du profil de vent qui sert de conditions aux limites. Cette analyse montre le bon comportement du schéma numérique utilisé en terme de stabilité. Elle montre également que des formules de transport appliquées à une même configuration donnent des évolutions très différentes et que ce choix de loi est très important en fonction du site à étudier. Les validations sur des bosses schématiques sont assez bonnes. Les applications sur cas réels montrent que les évolutions calculées sont qualitativement conformes aux évolutions mesurées mais sont quantitativement assez éloignées.

La limitation essentielle de ce module éolien provient du modèle de vent qui est utilisé en entrée du modèle et qui est généralement trop simplifié et approximatif pour pouvoir être jugé fiable. L'avenir de ce module de transport éolien passe par le développement d'un modèle de vent performant pouvant être créé avec les données terrains disponibles.

## **3.Modélisation hydraulique de la partie immergée**

Le modèle numérique utilisé pour simuler l'hydrodynamique du site est le modèle aux éléments finis Reflux 2DV. Ce modèle de type Boussinesq étendu développé par <sup>3</sup>Meftah (1998) permet de décomposer les composantes de la vitesse et la pression non-hydrostatique sur une série de fonctions dépendant uniquement de  $z$ , ce qui permet de remplacer la dimension verticale par un nœud unique enrichi en degrés de liberté. Cette décomposition analytique permet d'améliorer implicitement la relation de dispersion linéaire du modèle et sa faculté à reproduire le profil vertical de vitesse lorsqu'on augmente le nombre de fonctions  $N$  de la base choisie. Une étude récente (<sup>4</sup>Meftah et al., 2004) montre également que ce modèle peut traiter le shoaling linéaire ainsi que l'action des fortes pentes. Ce modèle permet également de choisir le type de bases en fonction de la nature physique de l'écoulement

(logarithmique pour un écoulement fluvial, hyperbolique pour une étude de houle ou des polynômes de Legendre par défaut).

### 3.1.Méthode h-s

La composante horizontale de la vitesse s'exprime sous la forme d'une série sur la verticale:

$$u(x,z,t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(z, z_b, h) u_i(x,t) \quad (1)$$

où  $z_b$  est la cote du fond,  $h$  le niveau de la surface libre,  $\phi_i(z)$  une base de fonctions que nous prenons par défaut des polynômes de Legendre,  $N$  l'ordre de discrétisation du modèle.

### 3.2.Système à résoudre

Ecrivant les équations de Navier-Stokes, l'intégration de l'équation de conservation de la masse de la cote du fond  $z_b$  à la surface libre  $h$  donne l'équation suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad \text{avec} \quad q = \int_{z_b}^h u dz \quad (2)$$

L'intégration de l'équation de la conservation de la masse de la cote du fond  $z_b$  à la cote  $z$  donne l'expression de la composante verticale de la vitesse  $w$  en fonction de différentes variables ne dépendant que de  $z$ . De la même façon, l'intégration de l'équation donnant la conservation de la composante verticale de la quantité de mouvement (en utilisant la formule de  $w$  trouvée précédemment) de la cote  $z$  à la surface libre  $h$  permet de décomposer la pression  $p$  sur des fonctions ne dépendant que de  $z$ . Le système à résoudre pour notre modèle est alors:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial r_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

où  $u$ ,  $w$  et  $p$  sont trois fonctions pouvant s'exprimer sous forme de séries fonctions des composantes  $u_i$  de la vitesse horizontale et de fonctions ne dépendant que de  $z$ . La masse volumique du fluide est notée  $\rho$ . Le terme  $r_x$  est un terme de type contrainte de radiation rajouté dans notre modèle initial pour pouvoir prendre en compte le déferlement (voir ci-dessous). Un algorithme classique aux éléments finis permet alors de trouver, pour chaque nœud du maillage, le niveau d'eau  $h$  et les différentes composantes  $u_i$  permettant de reconstituer le profil vertical de la vitesse.

## 4.Module de déferlement

Dans la zone côtière, le déferlement a un rôle prédominant dans le transport sédimentaire car il est à l'origine de la mise en suspension du sable qui se trouve ensuite déplacé par les courants (dont les courants de houle générés à cette occasion). Il est donc important de bien prendre en compte ce phénomène physique complexe ainsi que ses conséquences immédiates comme le courant de retour par exemple ou le battement de la zone de swash. Notre module de déferlement est directement inspiré de celui de <sup>5</sup>Madsen *et al.* (1997) et il s'agit d'un modèle de type « Surface Roller Concept » qui consiste à analyser géométriquement les pentes de chaque vague pour tous les pas de temps et à comparer ces pentes avec une pente critique au delà de laquelle on considère que la vague déferle. À partir de cet instant  $t_B$  où une

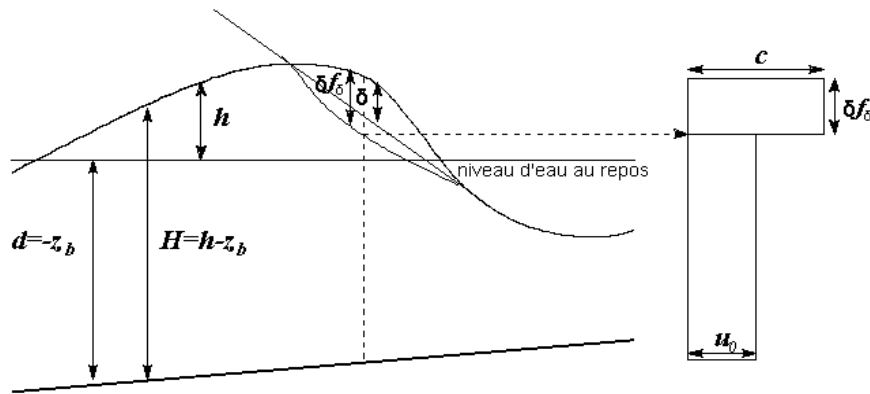
vague commence à déferler, on repère de façon géométrique la forme du rouleau déferlant (l'aire se situant entre la tangente et la surface libre) que l'on modifie en le multipliant par un facteur de forme  $f_\delta$  pour remplacer la tangente par une courbe plus réaliste (voir figure 1). Une fois repéré, ce rouleau se voit appliquer un profil de vitesse présenté sur la figure 1 qui force le rouleau déferlant à aller plus vite que le reste de la vague et les équations de Boussinesq sont légèrement modifiées en ajoutant le terme en  $r_x$  dû à la distribution non uniforme de la vitesse pour un rouleau.

La célérité  $C$  associée au rouleau peut être calculée numériquement pour chaque pas de temps mais cela mène généralement à des instabilités numériques et c'est pourquoi on considère généralement que  $C=1,3 (gH)^{1/2}$  avec  $H=h-z_b$ ,  $g$  la gravité. Le terme  $r_x$  associé vaut alors:

$$r_x = \frac{\delta f_\delta}{H - \delta f_\delta} (C - U_0)^2 \quad (4)$$

La vitesse moyenne  $U_0$  de la vague sous le rouleau peut s'exprimer de la façon suivante:

$$U_0(x,t) = \frac{1}{H} \int_{z_b}^h u(x,z,t) dz = \frac{1}{H} \int_{z_b}^h \phi_1(z) u_1(x,t) dz \quad (5)$$



**Figure 1:** Description géométrique d'un rouleau déferlant et distribution verticale de la vitesse horizontale.

Notre modèle de déferlement est identique au modèle de Madsen *et al.* en ce qui concerne le calcul de  $r_x$ . On remarque en particulier que  $r_x$  ne dépend que de  $u_1$  qui devient de plus en plus précis lorsque  $N$  augmente. De même, l'hydrodynamique des vagues non déferlantes est de plus en plus fine lorsque le nombre  $N$  de fonctions augmente ce qui permet alors de traiter les vagues déferlantes dans de meilleures conditions. Dans le cas où  $N=1$ , notre modèle est équivalent à un modèle « classique » de Boussinesq de Peregrine (1967) car la vitesse horizontale est alors moyennée sur la verticale pour donner un profil de vitesse identique.

Le déferlement a lieu quand la pente locale de la surface libre dépasse l'angle critique de valeur  $\varphi_B$ . De nombreux tests ont permis de trouver la valeur de ce dernier.  $\varphi_B$  est de  $20^\circ$  pour le déferlement de type 'Glissant', mais peut prendre d'autres valeurs pour d'autres types de déferlement. Après le début de déferlement du premier rouleau, l'angle critique de ce dernier varie graduellement de  $\varphi_B$  jusqu'à  $\varphi_0$  en suivant une loi exponentielle:

$$\tan \varphi(t) = \tan \varphi_0 + (\tan \varphi_B - \tan \varphi_0) \exp\left(-\frac{t - t_B}{t^*} \ln(2)\right) \quad (6)$$

- $t_B$  est l'instant où le déferlement commence,
- $t_*$  est un temps caractéristique exprimant la décroissance plus ou moins rapide du rouleau,
- $t$  représente la "vie" du rouleau. Le rouleau "meurt" et disparaît lorsque  $\varphi$  devient inférieur à  $\varphi_0$ .

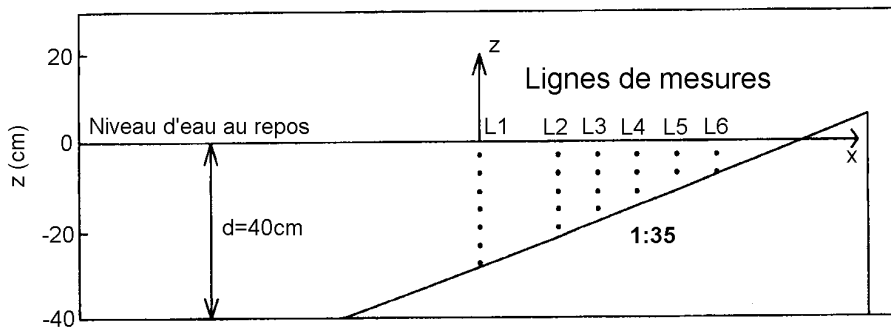
Pour le jeu de paramètres, on prend par défaut :

$$(\varphi_B, \varphi_0, t_*, f_\delta) = (20^\circ, 10^\circ, T/5, 1.5) \quad (7)$$

avec  $T$  la période de l'onde incidente.

### **5. Validation du modèle de déferlement**

Le modèle de déferlement décrit ci-dessus a été validé sur plusieurs cas-tests dont celui très complet présenté par <sup>7</sup>Cox. Il s'agit d'un modèle physique qui a été construit dans un canal à houle de 33 m de long, 0,6 m de large et 1,5 m de profondeur. La houle se propage en amont sur un fond plat avant d'arriver sur une pente 1:35 imperméable sensée correspondre à une plage dissipative. Sur cette pente sont placées régulièrement 6 positions de mesures dont la première L1 se trouve dans la région de shoaling juste avant le déferlement, la deuxième L2 se trouve au point de déferlement et les positions L3-L6 sont placées après le déferlement pour étudier les différents stades de ce phénomène (voir figure 2).



*Figure 2: Conditions expérimentales du test physique de validation.*

Pour chaque ligne de mesures, le niveau d'eau est mesuré en temps réel ainsi que les composantes horizontales et verticales de la vitesse pour plusieurs positions sur chaque ligne à l'aide d'un vélocimètre à Laser Doppler (LDV).

Nous avons utilisé notre modèle Boussinesq étendu Reflux2DV couplé avec le modèle de déferlement (tous deux présentés ci-dessus) en étudiant deux cas de figure à savoir  $N=1$  (Modèle de Boussinesq « classique ») et  $N=3$  pour Reflux 2DV. Le quadruplet de paramètres utilisé pour calibrer le module de déferlement sur ce cas-test est légèrement différent du quadruplet par défaut et est composé des valeurs suivantes :

$$(\varphi_B, \varphi_0, t_*, f_\delta) = (20^\circ, 10^\circ, T/10, 1.9) \quad (8)$$

Notre modèle se comporte naturellement très bien jusqu'au point de déferlement L2 malgré le shoaling qui fait gonfler la houle. A partir de la position L2, le module de déferlement devient actif et fait diminuer progressivement l'amplitude de la houle au cours de sa propagation. Cette diminution est bien restituée par le module de déferlement tant dans la diminution de l'amplitude que dans la modification de la forme de la houle. On peut quand

même noter que l'amélioration des résultats en augmentant le nombre de fonctions  $N$  sur la base est moins flagrante dans ce test qu'elle ne l'est généralement dans les tests ne modélisant que la partie hydrodynamique. On peut néanmoins noter pour ce test une légère surévaluation de l'amplitude de la houle pour  $N=1$  alors que prendre  $N=3$  corrige cela et donne une amplitude calculée proche de la réalité. La figure 3 présente les résultats donnés par Reflux2DV couplé au module de déferlement présenté ci-dessus pour 4 positions après le point de déferlement (L3, L4, L5 et L6) pour  $N=3$  et pour une période de houle (les courbes en trait plein correspondent aux mesures physiques tandis que les courbes ornementées de symboles correspondent aux résultats de notre modèle numérique). On remarque que ce modèle couplé restitue bien la diminution de l'amplitude de la houle au cours du déferlement ainsi que la déformation de la forme de la houle malgré quelques petites différences.

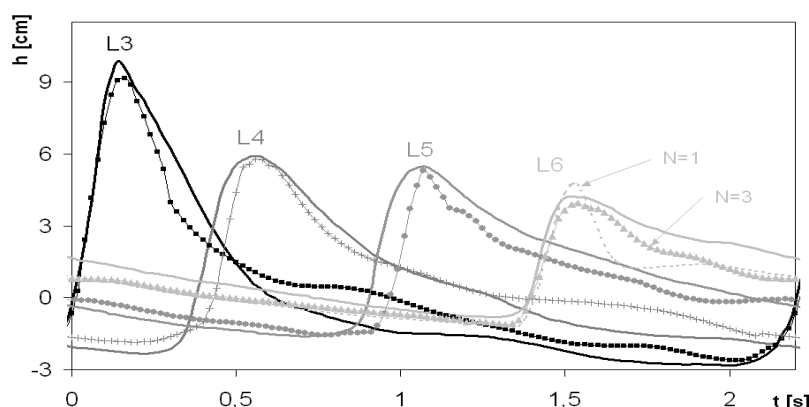


Figure 3: Comparaisons des résultats physiques (traits pleins) et numériques (symboles).

## 6. Obtention des conditions aux limites du modèle 2DV

Le modèle hydrodynamique développé sera utilisé pour modéliser 400 m du profil immergé et il est nécessaire de bien connaître les conditions de houle qui seront fixées en entrée. La houle est mesurée en Camargue à la Bouée de Beauduc à 12 km du site d'étude et, après examen statistique des données de houle données par cette Bouée de Beauduc (voir figure 4), quatre types de conditions de houle prédominantes ont été retenus pour la suite de l'étude. Le logiciel utilisé pour propager la houle du large jusqu'à la cote est le logiciel SWAN développé par TU Delft. SWAN reproduit l'évolution au cours du temps du spectre directionnel d'action d'onde de la houle à chaque nœud d'une grille de calcul. Son principal domaine d'application reste cependant la pleine mer ainsi que les profondeurs intermédiaires, pouvant aller assez près des côtes, dans la limite où il n'y a pas de relief (cap, promontoires) générant de la diffraction des houles ni d'ouvrages. SWAN utilise la méthode des différences finies sur une grille linéaire ou curvilinéaire dans les 5 directions (temps, espace géographique, espace fréquentiel). Malgré une bathymétrie ne datant que de 1974 et des données de vents parfois dissonantes entre les différentes stations de mesures de la région, la plus grande limitation vient des données de houle elle-même qui a subi la réfraction des fonds et ne peuvent être considérées comme des données du large car la profondeur du houlographe n'est que de 14 m. Comme les données de houle ne sont pas des données du large, il faut étendre ce modèle plus au large que la position de la bouée. Une solution de calcul aurait été d'ajuster par itérations les conditions au large pour retrouver les valeurs au niveau de la bouée mais ce travail est pratiquement impossible à réaliser dans l'optique de simuler 3 ans de mesure avec un pas de temps horaire (~11 331 ajustements). Pour palier ce problème, une

autre méthode a été développée qui consiste à recréer un catalogue de données au large permettant de retrouver les données à Beauduc puis les données à la côte.

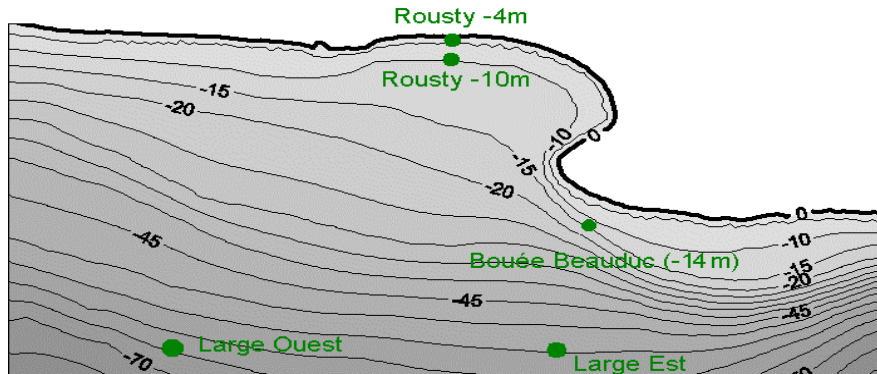


Figure 4: Domaine d'étude.

Le principe de la méthode est assez simple, il consiste à lancer un ensemble de simulation avec des conditions type données au large avec une hauteur de houle, une période et une direction dans un ensemble physiquement cohérents. Nous obtenons grâce à cela un jeu de résultats au niveau de la bouée de Beauduc. Pour chaque donnée réelle enregistrée, nous avons la valeur qui se trouve à l'intérieur d'un tétraèdre (espace à trois dimensions  $H_p$ ,  $T_{01}$ , Direction). Nous pouvons alors interpolier pour retrouver cette valeur à partir des résultats de calcul des simulations. En considérant que nous pouvons appliquer la même interpolation sur le site de Rousty, nous obtenons donc une valeur horaire correspondant à la donnée de Beauduc enregistrée.

Après cette première interpolation de houle faite, les climats de vents prédominants sont ensuite injectés dans le modèle SWAN et il faut recommencer le même travail d'interpolation et d'établissement d'un catalogue numérique en n'ayant dans ce cas de figure que deux paramètres d'entrée qui sont la vitesse du vent et sa direction.

Ce travail aboutit à la fourniture d'un fichier comprenant les données sur le site de Rousty pendant 3 années avec une indication de la qualité de la donnée fournie en sachant quel est le type d'interpolation utilisée pour l'obtenir. Ce catalogue numérique de houle servira ensuite de condition aux limites du modèle 2DV intégré pour modéliser l'évolution d'un profil du Rousty sur une année complète en les comparant aux mesures coincidentes.

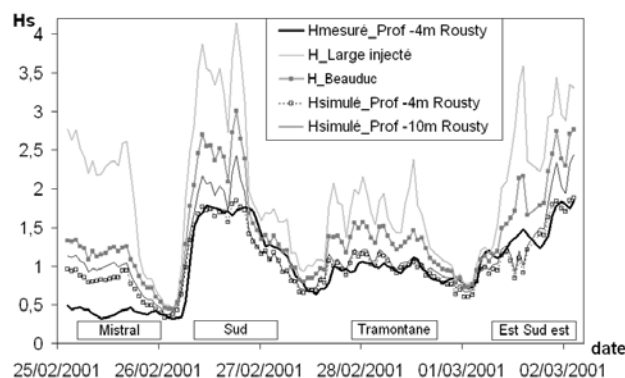


Figure 5: Résultats de la propagation de houle avec SWAN et mesures.

## 7. Conclusions

Dans le but de créer un outil de gestion intégré des plages sableuses nous avons entrepris la conception d'un modèle numérique global prenant en compte les phénomènes physiques prédominants dans le transport sédimentaire du système Dune - Plage émergée - Plage immergée. Ces phénomènes physiques sont généralement des phénomènes suffisamment complexes à modéliser (déferlement, courants de retour, transport éolien, activité sédimentaire dans la zone de déferlement,...) lorsqu'ils sont traités isolément et il faut donc être précautionneux lorsqu'on souhaite les intégrer dans un modèle unique. Nous disposons actuellement d'un modèle de transport éolien validé sur des cas schématiques mais nécessitant une amélioration notable du modèle de vent utilisé en entrée. Nous disposons également d'un modèle étendu de Boussinesq permettant d'obtenir une hydrodynamique fine de la zone immergée à étudier qui a été couplé avec un module de déferlement de type Surface Roller Concept validé sur plusieurs cas-tests dont celui présenté par Cox. Un module de transport sédimentaire utilisant des lois de transport pour des houles asymétriques (loi de Bailard, loi de Dibajnia-Watanabe,...) est actuellement en cours de validation sur des cas tests où il faut réussir à modéliser la migration de barres. Une fois ce module achevé et validé, il faudra le coupler avec tous les autres présentés ci-dessus en créant également un module d'échange de sédiment entre la partie terrestre et marine. Ce modèle intégré sera ensuite testé sur un profil du Rousty, profitant d'une instrumentation complète d'une année et de relevés bathy-métriques et topographiques fréquents et en essayant de reproduire la migration saisonnière des barres internes et externes.

### **8. Références:**

1. Sabatier F., 2001, Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône, Thèse, Université Aix-Marseille III, 272p
2. Pons F., 2001, Évolution des dunes sous l'effet du transport éolien, Rapport du projet national Liteau : Conception d'un système de gestion des plages sableuses, 55p + Annexes
3. Meftah K., 1998, Modélisation tridimensionnelle de l'hydrodynamique et du transport par suspension. Thèse à l'Université de Technologie de Compiègne.
4. Meftah K., Sergent P., Gomi P., 2004, Linear Analysis of a new type of extended Boussinesq model, Coastal Engineering, 51, pp 185-206.
- 5a. Madsen P.A., Sørensen O.R., Schäffer H.A., 1997, Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coastal Engineering; 32, pp. 255-288.
- 5b. Madsen P.A., Sørensen O.R., Schäffer H.A., 1997, Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II. Surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves, Coastal Engineering; 32, pp. 289-320.
6. Peregrine, D.H., 1967, Long Waves on a beach. Journal of Fluid Mechanics, Vol 27, 815-827.
- 7a. Cox D.T., Kobayashi N., 2000, Identification of intense, intermittent coherent motions under shoaling and breaking waves, Journal of Geophysical Research, Vol 105, N° C6, pp. 14,223-14,236
- 7b. Cox D.T., Kobayashi N., Okayasu, A., 1994, Vertical variations of fluid velocities and shear stress in surf zones, Proceedings 24<sup>th</sup> International Conference Coastal Engineering Research Council/ASCE, Kobe, Japan