

EDF R&D



DÉPARTEMENT LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE ET
ENVIRONNEMENT
GROUPE OUVRAGES D'EAU ET ENVIRONNEMENT

6, QUAI WATIER
F-78401 CHATOU CEDEX

TEL : 33 1 30 87 72 52
FAX : 33 1 30 87 80 86

Décembre 2003

DEPARTEMENT CERTIFIÉ AFAQ ISO 9001/2000

VILLARET C.

**Etude bibliographique des processus hydro-sédimentaires
de la zone de swash**

HP-75/03/030/A

Documents associés : Néant

Résumé :

Ce rapport présente une étude bibliographique des processus hydro-sédimentaires qui gouvernent la zone de swash ou jet de rive. Cette étude s'appuie notamment sur le numéro spécial de la revue Coastal Engineering (45, 2002) consacré au projet européen SASME ('Surf and Swash Zone Mechanics').

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention entre EDF-LNHE et le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) du Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer. Elle fait l'objet d'un financement de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) au travers du contrat 01-DST-24.

Accessibilité : LIBRE

© EDF 2003

EDF R&D LNHE	Etude bibliographique des processus hydro-sédimentaires de la zone de swash	HP-75/03/030/A Page 2/24
----------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------

Auteur	VILLARET C.
Code Action	P7502R
Classement Interne	P75J25

Type de rapport	Note technique
Nombre de pages	24
Orientation dans le fonds documentaire	<input type="checkbox"/> EDF DOC (accès à tous les agents EDF) <input checked="" type="checkbox"/> R&D DOC (accès aux seuls agents R&D) <input type="checkbox"/> CONFIDENTIEL (accès réservé à la hiérarchie de l'entité émettrice)
Mots-clés	Etude bibliographique, zone de swash, houle non-linéaire, transport sédimentaire

Indice	Auteur	Vérificateur	Approbateur
A	VILLARET Catherine signé le 10/05/2003	BENOIT Michel signé le 11/12/03	FOURNIER Jean-Christophe signé le 11/12/03 <input checked="" type="checkbox"/> Autorise l'exploitation de la version électronique de cette note* pour alimenter les fonds documentaires de Galaxie. * sauf pour les notes confidentielles.

	Destinataire	Dept	Nb		Destinataire	Dept	Nb
@	Fonds-documentaire	AGIR/CIVAP	1		Sergent P.*	CETMEF	3
	Villaret C.	LNHE/P75	1		Chef Dépt	LNHE	S
	Benoit M.	LNHE/P75	1		Chef Dépt-délégué	LNHE	S
	Gonzales M.	LNHE/P75	1				
	Fournier J.C.	LNHE/P75	1		Moulin L.	DRAST	15
	Machet C.	LNHE/P75	1				
	Circ. Ingés	LNHE/P75	1				

Pré diffusion aux destinataires signalés par *	Diffusion : P pour pages de garde et contrôle, S pour pages de garde, de contrôle et de synthèse @ pour version électronique
------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Etude bibliographique des processus hydro-sédimentaires de la zone de swash

SYNTHESE

La zone de swash (ou jet de rive) constitue la frontière entre la partie émergée de la plage et la zone de déferlement. Des quantités importantes de sédiments sont transportées lors des épisodes de 'run-up' et de 'run-down', lorsque les vagues déferlantes montent, puis redescendent sur la plage.

Nous présentons dans ce rapport une description des processus hydro-sédimentaires qui gouvernent la zone de swash et déterminent les évolutions morphodynamiques de la plage et du trait de côte. Nous présentons aussi un état de l'art des modèles existants. Cette étude bibliographique s'appuie principalement sur le numéro spécial de la revue Coastal Engineering consacrée au projet SASME ('Surf and Swash Zone Mechanics').

La zone de swash est caractérisée par un niveau de turbulence intense et des transports sédimentaires importants. L'hydrodynamique de la zone de swash est largement déterminée par les conditions de déferlement à l'amont, ainsi que la présence éventuelle d'ondes longues. Le transport s'effectue par 'sheet' flow sur fond plat, et le transport net est dû à différentes sources d'asymétrie entre les épisodes de 'run-up' et de 'run-down', ainsi qu'à la présence éventuelle de courants moyens (courant littoral ou jet de rive).

Les modèles à grande échelle, qui sont utilisés pour calculer la houle, les courants et le transport sédimentaire en zone côtière, peuvent généralement être étendus à la zone de surf, en tenant compte de la dissipation d'énergie supplémentaire à l'intérieur du rouleau de déferlement et des contraintes de radiation. Les différents codes du système TELEMAC ont été utilisés par Créhalet et al. (2001) pour calculer l'impact morphodynamique d'un brise lame. Plus récemment, le code de propagation de la houle (TOMAWAC), le modèle courantologique (TELEMAC-2D) et le modèle morphodynamique (SISYPHE) ont été appliqués, afin de calculer le transport littoral par Villaret et al. (2003).

Dans la zone de swash, les modèles classiques ne permettent pas en général de reproduire les processus complexes d'interactions entre la houle, les courants et les sédiments. Une approche diphasique, voir triphasique, serait nécessaire, et une étude de faisabilité est en cours au LNHE à l'aide du code SPARTACUS, qui repose sur une approche lagrangienne par la méthode SPH. Une approche simplifiée a été proposée par Karambas et Koutitas (2002) : elle consiste à étendre les modèles de propagation de la houle non-linéaire de type Boussinesq à la zone de swash, en introduisant un coefficient de viscosité artificielle. Ce modèle hydrodynamique, couplé à une équation d'évolution des fonds, dans laquelle le taux de transport est calculé par la formule de Dibajnia et Watanabé (1992), peut être appliqué pour calculer l'évolution d'un profil de plage dans la zone de swash.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention entre EDF-LNHE et le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) du Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer. Elle fait l'objet d'un financement de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) au travers du contrat 01-DST-24.

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	5
2.	PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES	6
2.1.	DÉLIMITATIONS DE LA ZONE DE SWASH	6
2.2.	HYDRODYNAMIQUE DE LA ZONE DE SURF	7
2.2.1.	<i>Conditions de déferlement</i>	7
2.2.2.	<i>Contraintes de radiation</i>	8
2.2.3.	<i>Courants moyens générés par la houle</i>	10
2.2.4.	<i>Ondes longues</i>	12
2.3.	HYDRODYNAMIQUE DE LA ZONE DE SWASH	13
2.3.1.	<i>Mouvements haute-fréquence</i>	13
2.3.2.	<i>Ondes longues</i>	14
2.3.3.	<i>Intensité de la turbulence</i>	14
2.3.4.	<i>Interactions avec la nappe souterraine</i>	15
2.3.5.	<i>Courants moyens</i>	15
3.	DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE.....	17
3.1.	MÉCANISMES DE TRANSPORT SÉDIMENTAIRE.....	17
3.2.	TRANSPORT NET	18
4.	ETAT DE L'ART EN MODÉLISATION	19
4.1.	ZONE DE SURF	19
4.2.	ZONE DE SWASH	21
5.	CONCLUSIONS.....	22
6.	RÉFÉRENCES	23

1. Introduction

La zone de swash constitue la frontière entre la partie émergée de la plage et la zone de déferlement. Elle est caractérisée par une variation intermittente de la hauteur d'eau ainsi qu'un niveau de turbulence élevé induit par le déferlement des vagues. Des quantités importantes de sédiments sont transportées lors des épisodes de 'run-up' et de 'run-down', lorsque les vagues déferlantes montent, puis redescendent sur la plage. Les variations spatiales du taux de transport dans les directions 'cross-shore' (normale à la plage) ou 'longshore' (parallèle à la plage) déterminent l'évolution du profil de plage et les oscillations du trait de côte.

Ces évolutions morphodynamiques doivent être prises en compte par les gestionnaires pour que des méthodes de protection efficaces puissent être mises en place le cas échéant, lorsque la plage est en déficit sédimentaire ou encore si l'espace dunaire se trouve fragilisé. Ces méthodes de protection doivent s'appuyer sur une bonne connaissance des processus hydro-sédimentaires et le développement d'outils de modélisation appropriés. Il est par ailleurs important aussi de pouvoir estimer le 'run-up' lors de la conception des plages artificielles, pour déterminer par exemple les risques de franchissement des digues de protection. D'autre part, la zone de swash joue le rôle de conditions aux limites pour les modèles à plus grande échelle, qui permettent de calculer la propagation de la houle et de la marée en zone côtière. Les processus hydro-sédimentaires de la zone de swash doivent donc être paramétrés dans ces modèles à grande échelle.

La zone de swash a été relativement moins étudiée que la zone de surf, ceci en raison principalement de la difficulté des mesures, qui sont affectées par la présence des sédiments et des bulles d'air. Le LNHE a participé de 1997 à 2000 au projet européen MAST, intitulé SASME ('Surf and Swash Zone Mechanics'), dont l'objectif général était d'améliorer la connaissance des processus hydro-sédimentaires dans la zone de surf et dans la zone de swash, par le biais d'expériences en laboratoire et le développement de modèles. Dans le cadre de ce projet, les modèles de houle et de courantologie du système TELEMAC ont été appliqués depuis le large jusque dans la zone de surf pour modéliser l'effet de brise-lames sur les courants et sur la houle (Créhalet et al., 2001).

Nous présentons dans ce rapport une description des processus hydro-sédimentaires qui régissent la zone de swash et déterminent les évolutions morphodynamiques de la plage et du trait de côte. Nous présentons aussi un état de l'art des modèles existants. Cette étude bibliographique s'appuie principalement sur le numéro spécial de la revue Coastal Engineering consacré au projet SASME.

La zone de swash est caractérisée par un niveau de turbulence intense et des transports sédimentaires importants. L'hydrodynamique de la zone de swash est largement déterminée par les conditions de déferlement à l'amont. La première partie de ce rapport concerne les processus hydrodynamiques qui régissent la zone de déferlement, ainsi que la zone de swash. La seconde partie décrit la dynamique sédimentaire, et la troisième les évolutions morphodynamiques du trait de côte. Enfin, la quatrième partie aborde les difficultés propres à la modélisation numérique.

2. Processus hydrodynamiques

2.1. Délimitations de la zone de swash

La zone de swash constitue la partie extrême de la zone de déferlement : ses limites amont et aval sont déterminées par les variations périodiques du niveau marin lorsque les vagues déferlantes atteignent la plage, avec une alternance d'épisodes de 'run-up' suivies du 'run-down'. A ces fluctuations périodiques est le plus souvent superposée une surélévation du niveau-moyen appelée 'set-up', comme schématisé sur la figure 1.

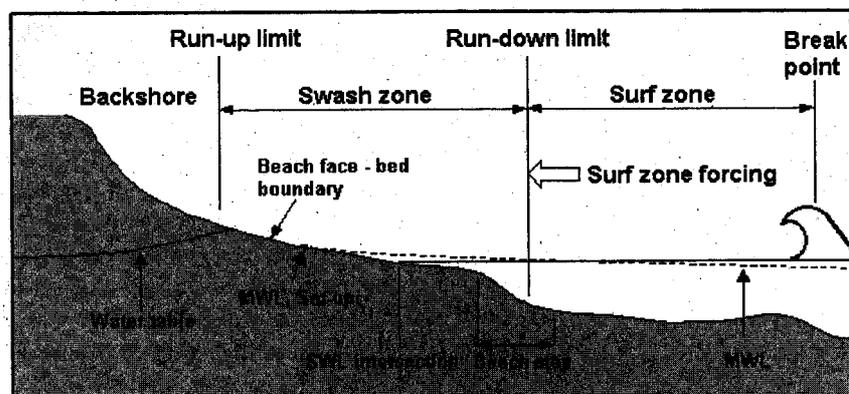


Figure 1. Schématisation de la zone de swash

Si l'étendue de la zone de swash est clairement définie par les limites extrêmes du 'run-up' et du 'run-down' dans le cas de houles monochromatiques en laboratoire, les variations du niveau marin correspondant à un état de mer réel sont aléatoires et les épisodes de 'run-up' et 'run-down' se succèdent avec des amplitudes différentes. Les limites extrêmes du 'run-up' et du 'run-down' dépendent alors non seulement de la hauteur de houle significative au large, mais aussi du groupement des vagues et des ondes longues générées dans la zone de déferlement. Ces limites sont aussi affectées par les interactions entre plusieurs épisodes de swash successifs.

La zone de swash désigne ainsi la partie de la plage qui se trouve immergée de manière intermittente et exposée à l'atmosphère sur des périodes longues (de l'ordre de plusieurs minutes) ou courtes (de l'ordre de quelques secondes).

2.2. Hydrodynamique de la zone de surf

2.2.1. Conditions de déferlement

Différents modes de déferlement

Le déferlement se produit dans la zone de surf externe. La houle, linéaire et irrotationnelle au large, se déforme en se propageant vers la côte pour devenir asymétrique. Au point de déferlement, il y a formation d'un rouleau et l'énergie de la houle se transforme en turbulence, pour être ensuite dissipée en chaleur. Le déferlement se produit lorsque la vitesse maximale instantanée dans la crête devient supérieure à la vitesse de propagation (vitesse de phase des vagues).

On distingue plusieurs types de déferlement suivant l'intensité du rouleau initial : le déferlement glissant ('spilling') correspond à des pentes douces, le déferlement plongeant ('plunging') est caractéristique des pentes moyennes, et le déferlement frontal ('surging'), se produit pour des pentes fortes. Les déferlements glissant et plongeant sont schématisés sur la figure 2 :

- Le type plongeant ('plunging') correspond à un déferlement brutal. L'intensité turbulente est répartie sur toute la hauteur d'eau, mais limitée à la zone de déferlement et se propage vers la plage.
- Le type glissant ('spilling') désigne un niveau de turbulence quasi-constant sur une longueur d'onde, mais localisé en surface.

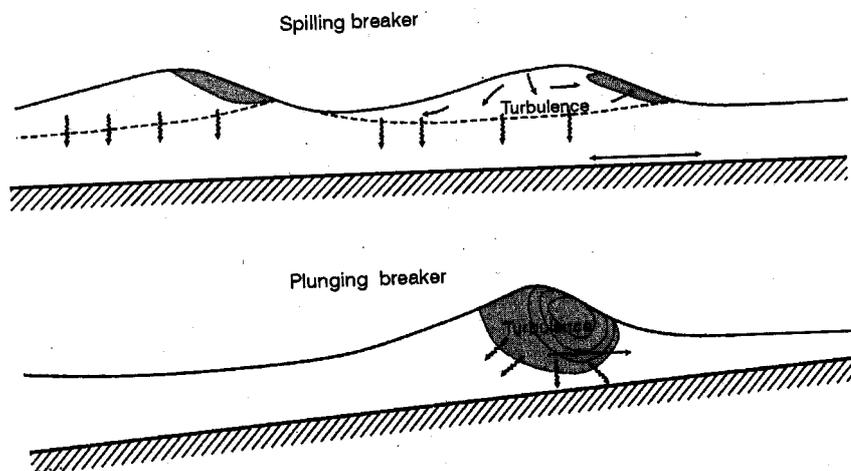


Figure 2 : Différents modes de déferlement

Notion de saturation

La zone de surf est considérée comme saturée, lorsque la hauteur de la houle a atteint sa valeur limite et devient proportionnelle à la profondeur d'eau. La hauteur de la houle déferlante est alors limitée à un certain pourcentage de la hauteur d'eau : $H/h \sim 0.8$, H étant la hauteur de la houle et h la hauteur d'eau. La valeur du coefficient de proportionnalité (H/h) dépend de la pente du fond et du type de déferlement.

La houle est en général considérée comme saturée pour des pentes relativement faibles et pour des déferlements de type glissant ('spilling'). Le déferlement se produit alors très au large de

la zone de swash. Dans la zone de surf interne, les ondes déferlantes peuvent être assimilées à la propagation de ressauts hydrauliques.

Nombre d'Iribarren

Les conditions de déferlement dépendent du nombre d'Iribarren, défini par (Iribarren and Nogales, 1949) :

$$I = \beta / (H_0 / L_0)^{0.5}$$

β étant la pente moyenne de la plage,

H_0 la hauteur de la houle au large,

L_0 la longueur d'onde.

La zone de surf interne est généralement considérée saturée et dominée par des déferlantes de type 'spilling', pour des pentes modérées ou faibles, lorsque $I < 0.5$. Pour des valeurs supérieures du nombre d'Iribarren ($I > 0.5$), on observe généralement des déferlements de type plongeant ('plunging') et des conditions non-saturées. Ce critère initialement établi pour des houles monochromatiques (Battjes, 1974) a été étendu à des états de mer réels par Guza et Thornton (1982), en utilisant la hauteur de houle significative au large et la période de pic.

2.2.2. Contraintes de radiation

L'effet des contraintes de radiation dans la zone de surf a été mis en évidence par Longuet-Higgins (1970). La dissipation de ces contraintes permet d'expliquer la variation du niveau moyen dans la direction cross-shore, et la génération d'un courant longshore.

Définition des contraintes de radiation

Les contraintes de radiation représentent le flux moyen de quantité de mouvement ('qdm') dû à la houle, moyenné sur une période de la houle et intégré sur la hauteur d'eau. Le tenseur des contraintes, noté \overline{S} , est représenté par ses composantes normales S_{xx} , et S_{yy} , et une composante tangentielle S_{xy} , l'axe x étant dirigé dans le sens de propagation de la houle, et l'axe y, dans la direction normale. L'axe vertical Oz est rapporté au niveau de la surface libre au repos ($z=0$). La cote ($z=-h$) correspond au fond.

Les composantes S_{xx} et S_{yy} du tenseur de radiation représentent les flux de 'qdm' dans la direction de propagation de la houle et dans sa direction normale:

$$S_{xx} = \rho \overline{\int_{-h}^{\eta} \left(u^2 + \frac{P - P_0}{\rho} \right) dz}$$

$$S_{yy} = \rho \overline{\int_{-h}^{\eta} \left(v^2 + \frac{P - P_0}{\rho} \right) dz}$$

avec ρ la densité du fluide,

g la gravité,

η la cote de la surface libre

u et $v=0$, les composantes horizontales dans les directions x et y du mouvement périodique généré par la houle, et $\overline{u^2}$, $\overline{v^2} = 0$, les moyennes quadratiques sur une période de la houle.

$(P - P_0)$ représente l'excès de pression par rapport à la pression hydrostatique : ce terme

est dû aux vitesses verticales générées par la houle.

La composante tangentielle S_{xy} est nulle ($v=0$):

$$S_{xy} = \rho \int_{-h}^{\eta} (uv) dz = 0$$

Cas d'une houle linéaire

Par application de la théorie linéaire, on peut calculer analytiquement les composantes S_{xx} et S_{yy} du tenseur de radiation :

$$S_{xx} = E \left(\frac{2kh}{\sinh(2kh)} + \frac{1}{2} \right)$$

$$S_{yy} = E \frac{kh}{\sinh(2kh)}$$

E étant l'énergie de la houle ($E=1/8 \rho g H^2$) et $k=2\pi/L$ le nombre d'onde.

En eau peu profonde ($kh \rightarrow 0$), on aboutit au résultat suivant :

$$S_{xx} = \frac{3}{2} E$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2} E$$

Set-up

Dans la zone de déferlement, il y a dissipation d'énergie sur le fond et dans le rouleau de déferlement. Les variations spatiales du tenseur de radiation doivent être compensées par un gradient de pression dans la direction offshore, ce qui se traduit par une augmentation du niveau moyen appelée 'set-up'.

$$\frac{\partial}{\partial x} S_{xx} + \frac{\partial}{\partial x} \rho g \bar{\eta} = 0 \quad (1)$$

avec x la direction normale à la plage,
 $\bar{\eta}$ le niveau moyen.

2.2.3. Courants moyens générés par la houle

L'hydrodynamique de la zone de surf est affectée par la présence de courants moyens, générés par la houle. Ces courants déterminent la direction et le transport net des sédiments.

Courant littoral

La variation des contraintes de radiation à l'intérieur de la zone de surf permet d'expliquer la génération d'un courant longshore \bar{V} , dirigé parallèlement à la plage. On considère ici le cas schématique d'une plage rectiligne orientée dans la direction Oy, et d'une houle incidente qui fait un angle θ avec la normale à la plage.

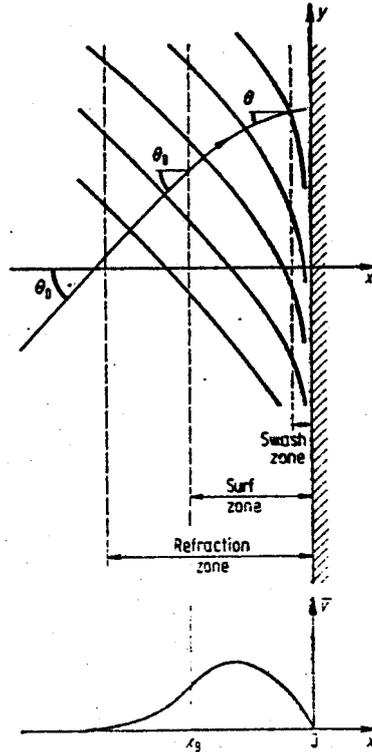


Figure 3 : Vue schématique d'après Longuet-Higgins (1970)

Dans le repère lié à la plage, la contrainte de cisaillement τ_{xy} est calculée à partir des contraintes de radiation par un changement de repère: $\tau_{xy} = (\vec{S} \cdot \vec{Ox}) \cdot \vec{Oy}$, soit :

$$\tau_{xy} = E \left(\frac{kh}{\sinh(2kh)} + \frac{1}{2} \right) \sin \theta \cos \theta$$

En utilisant la loi de Snell ($\sin \theta/c = \text{constante}$, c étant la vitesse de propagation de la houle), on peut montrer que la contrainte de cisaillement est constante à l'extérieur de la zone de déferlement. La dissipation d'énergie dans la zone de déferlement entraîne une réduction de la contrainte τ_{xy} , d'où l'existence d'une force F_y , qui génère un courant moyen parallèle à la plage ($\bar{V} > 0$).

$$F_y = - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}$$

Courant de retour

Le courant de retour U ('undertow'), dirigé suivant l'axe Ox normal à la plage (voir fig. 1) est un courant intense, dirigé 'offshore' au niveau du fond ($U < 0$). Différents mécanismes interviennent pour déterminer le profil vertical du courant moyen:

- le courant de retour permet de compenser l'apport de masse à l'intérieur du rouleau et dirigé vers la plage.
- le courant de retour est nécessaire pour assurer un bilan des forces en tous points sur la verticale. En effet, si l'équation (1) permet d'assurer une conservation globale de la quantité de mouvement, en un point donné sur la verticale, le bilan des forces s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho (\overline{u^2} - \overline{w^2}) + \frac{\partial}{\partial x} \rho g \eta + \frac{\partial}{\partial z} \rho \overline{uw} = \frac{\partial}{\partial z} \rho \nu_t \frac{\partial U}{\partial z}$$

ν_t étant la viscosité turbulente ; le terme \overline{uw} représente les corrélations entre les fluctuations de vitesses horizontales et verticales. Ce terme doit tenir compte des composantes périodiques ainsi que des fluctuations turbulentes $\overline{u'w'}$.

Le mécanisme de génération d'un courant moyen à l'intérieur même de la couche limite de fond a été mis en évidence par Longuet-Higgins (1953) qui, en supposant une viscosité constante sur la verticale, aboutit au résultat suivant pour la vitesse moyenne U_b calculée à l'extérieur de la couche limite :

$$U_b = \frac{1}{8} c \left(\frac{H}{h} \right)^2$$

D'après ce résultat, le courant moyen U_b est dirigé 'onshore' ($U_b > 0$) tout près du fond, puis s'inverse à l'extérieur de la couche limite de fond, comme illustré sur la figure 4.

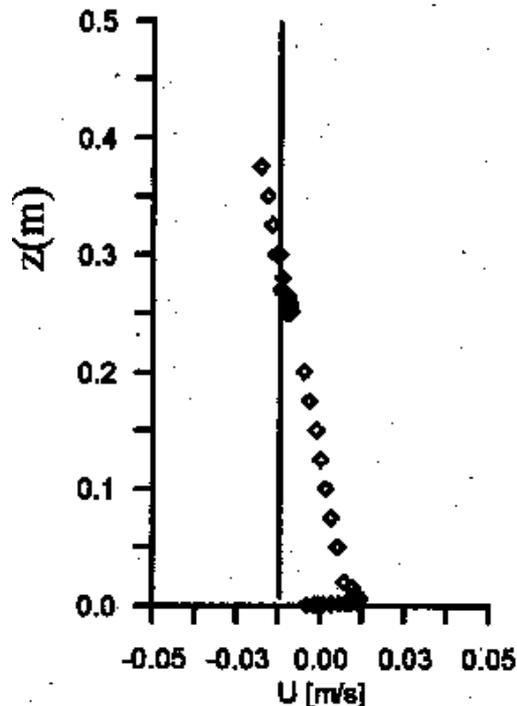


Figure 4: Profil des vitesses moyennes ('o' : mesures réalisées par Klopman, 1998).

2.2.4. Ondes longues

Mécanismes de génération

Différents mécanismes liés au groupement des vagues permettent d'expliquer la génération d'ondes longues dans la zone de surf. Typiquement, les ondes longues ou 'surf beat' sont fortement corrélées aux ondes de gravité et dues aux variations de la hauteur des ondes incidentes et à leur groupement (Longuet Higgins et Stewart, 1962, 1964). Plus récemment, Baldock et al. (2000) donnent une revue des différents mécanismes de génération des ondes longues.

Certaines ondes longues se propagent dans la direction 'cross-shore' et se trouvent réfléchies à la côte. D'autres ondes, telles que par exemple les 'edge-waves', génèrent des modulations de la hauteur des houles incidentes dans une direction 'longshore'.

Jets de rives ('rip currents')

Les courants littoraux peuvent être localement interrompus par des courants dirigés normalement à la côte appelés 'jets de rives'. Bowen et Inman (1969) ont expliqué le mécanisme de génération de ces jets de rives : la modulation de la hauteur de houle incidente par les 'edge-waves' entraîne une variation de la distance à la côte du point de déferlement, d'où une variation spatiale du 'set-up' le long de la côte. La variation du set-up induit à son tour un gradient de pression longshore qui génère une recirculation avec la formation de 'jets de rives' dirigés vers le large.

Effets des ondes longues

La présence de ces ondes longues se traduit par des énergies basse-fréquence qui viennent moduler les énergies haute-fréquence. Les énergies basse-fréquence, lorsqu'elles sont dominantes dans la zone de surf, le sont aussi dans la zone de swash et contrôlent alors les évolutions morphodynamiques. L'énergie des ondes longues est typiquement dominante pour des faibles valeurs du nombre d'Iribarren.

2.3. Hydrodynamique de la zone de swash

L'hydrodynamique de la zone de swash est déterminée par les conditions hydrodynamiques issues de l'amont, en limite de la zone de surf interne, et par le profil de plage. La zone de swash est caractérisée par :

- (1) des mouvements haute-fréquence (épisodes de 'run-up' et de 'run-down'),
- (2) la présence d'ondes longues et des oscillations dans la direction longshore,
- (3) l'intensité de la turbulence,
- (4) des phénomènes d'infiltration et de percolation.

2.3.1. Mouvements haute-fréquence

'Run-up'/'run down'

Des mouvements haute-fréquence (de l'ordre de la seconde) sont générés par l'arrivée sur la plage des ondes de gravité déferlantes. On observe au passage de chaque vague, la montée rapide d'une langue bouillonnante. Cette phase, dite de 'run-up', peut être assimilée à la propagation d'un ressaut hydraulique. La phase, dite de 'run-down', est en général plus lente et caractérisée par une diminution rapide des hauteurs d'eau. L'écoulement peut devenir localement supercritique. Les vitesses maximales lors du 'run-up' et du 'run-down' peuvent atteindre entre 1 et 5 m/s.

Les épisodes de 'run-up' et de 'run-down' sont dissymétriques en intensité, en durée et en direction : le 'run-up' est une phase d'accélération brutale et intense et sa direction correspond à celle de la houle incidente, tandis que les courants pendant le 'run-down' sont en général orientés dans le sens de la pente.

Interaction avec le courant de retour

Pendant le 'run-up', il y a divergence de l'écoulement à la frontière entre la zone de surf et la zone de swash. Cet effet tend à étirer la lentille d'eau pendant le 'run-up' et donc à diminuer les hauteurs d'eau.

Conditions de saturation

Les processus de 'run-up' et de 'run-down' sont déterminés par le déferlement à l'amont, et présentent des caractéristiques différentes suivant les conditions de saturation de la zone de surf.

La zone de swash est considérée comme saturée, lorsque la houle incidente a dissipé son énergie en excès au cours du déferlement et que, localement, la hauteur de la houle a atteint sa valeur maximale. Un critère a été proposé par Miche (1951) qui introduit le paramètre adimensionnel suivant :

$$\varepsilon_s = \frac{a_s \omega^2}{g\beta^2}$$

avec a_s : l'amplitude verticale du 'run-up'/'run-down',
 $\omega=2\pi/T$: la fréquence angulaire,
 β : la pente de la plage.

EDF R&D LNHE	Etude bibliographique des processus hydro-sédimentaires de la zone de swash	HP-75/03/030/A Page 14/24
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------	------------------------------

D'après Miche, pour une houle monochromatique, les conditions de saturation sont atteintes lorsque $\varepsilon_s=1$. Les observations en laboratoire et in-situ ont permis de confirmer l'hypothèse de Miche, même si, expérimentalement, on trouve une valeur bien supérieure pour ε_s .

Interactions entre différents épisodes de swash successifs

Pour une houle aléatoire, l'amplitude de la houle incidente varie et les épisodes de swash se succèdent avec des intensités variables. Les interactions entre swash de périodes différentes ont tendance à augmenter la période moyenne des swash. Cet effet est plus important pour des nombre d'Iribarren plus faibles.

2.3.2. Ondes longues

Importance des ondes longues

Les oscillations observées dans la zone de swash sont dues soit à la propagation des ondes de gravité (ondes courtes) déferlantes, soit à la présence des ondes infra-gravitaires (ondes longues), non déferlantes et stationnaires. Les ondes longues, générées dans la zone de surf, sont responsables des oscillations basse-fréquence observées dans la zone de swash. Les mouvements basse-fréquence sont importants dans les conditions suivantes :

- les mouvements basse-fréquence sont dominants dans la zone de surf,
- l'énergie des ondes de gravité est dissipée dans la zone de déferlement,
- les ondes courtes sont saturées.

Les vitesses induites par ces mouvements infra-gravitaires sont en général plus faibles que celles liées au déferlement des ondes de gravité.

Influence du nombre d'Iribarren

L'importance relative des mouvements basse-fréquence dépend du nombre d'Iribarren : on observe typiquement une dominance des énergies basse-fréquence pour des pentes faibles lorsque $I < 1.5$, tandis que l'énergie des ondes courtes domine pour des nombres d'Iribarren supérieurs à cette valeur. Cependant, la valeur critique du nombre d'Iribarren dépend du site étudié.

Ces considérations ne sont pas valables dans le cas des ondes monochromatiques réalisées en laboratoire: l'énergie haute-fréquence est alors dominante, quelque soit la valeur du nombre d'Iribarren.

2.3.3. Intensité de la turbulence

Mécanismes de production

On distingue essentiellement deux sources de production de turbulence, l'une à l'intérieur du rouleau de déferlement en surface, et l'autre à l'intérieur de la couche limite de fond, comme

schématisé sur la figure 5. Une autre source de turbulence est liée aux interactions entre les épisodes de swash successifs, à la rencontre entre le 'run-down' et le 'run-up' suivant.

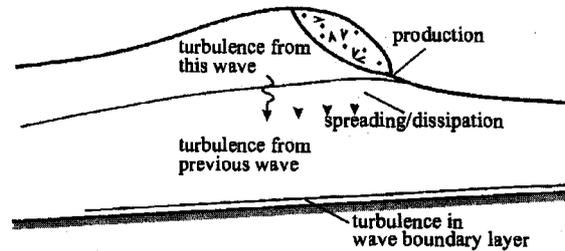


Figure 5 : Sources de turbulence

Dissymétrie entre les épisodes de 'run-up' et de 'run-down'

Pendant le 'run-up', la turbulence générée en surface est alors dominante par rapport à celle de la couche limite au fond, tandis que, pendant le 'run-down', c'est la turbulence générée à l'intérieur de la couche de fond qui devient dominante.

Mélange triphasique

L'intensité des mouvements turbulents a pour effet d'augmenter le taux de transport des sédiments et des bulles d'air. L'entraînement de bulles d'air devient important lorsque l'énergie cinétique turbulente en surface excède la tension superficielle. On est donc en présence d'un milieu triphasique.

2.3.4. Interactions avec la nappe souterraine

Infiltration/percolation

Les processus d'infiltration et de percolation sont liés au niveau de la nappe souterraine, qui subit elle-même des variations saisonnières. Il y a en général infiltration pendant la phase de 'run-up' et percolation pendant le 'run-down'. Cependant, les volumes d'eau échangés à travers la surface du lit restent en général assez faibles, sauf si l'on est en présence de sédiments très grossiers. Les conséquences de ces processus d'infiltration et de percolation sont donc peu importantes sur le plan hydrodynamique. Par contre, ces effets doivent être pris en compte dans la dynamique sédimentaire.

Interactions avec la turbulence

Les processus d'infiltration et de percolation interviennent dans une description fine des mouvements. Lors de la phase de 'run-up', le processus d'infiltration crée un gradient de pression dirigé vers le bas qui a tendance à diminuer l'épaisseur de la couche limite et à augmenter les vitesses et le cisaillement. Pendant le 'run-down', c'est l'effet inverse qui se produit.

2.3.5. Courants moyens

Courant littoral

EDF R&D LNHE	Etude bibliographique des processus hydro-sédimentaires de la zone de swash	HP-75/03/030/A Page 16/24
----------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	------------------------------

Comme pour la zone de surf, on observe, dans la zone de swash, un courant moyen 'longshore' généré par une houle incidente oblique à la plage. Cependant, les mécanismes de génération sont différents entre ces deux zones. En effet, à l'intérieur de la zone de swash, le courant littoral est dû à la différence de direction entre les vitesses au cours du 'run-up' et du 'run-down' : l'écoulement est dirigé perpendiculairement au crêtes de la houle durant le 'run-up' et suit la pente de la plage pendant le 'run-down'.

L'intensité de ce courant moyen est d'autant plus importante que la pente de la plage est forte, et dans des conditions relativement calmes. Le maximum de courant est en général observé au niveau moyen, soit à mi-chemin entre le 'run-up' et le 'run-down'.

3. Dynamique sédimentaire

3.1. Mécanismes de transport sédimentaire

Sheet flow

La zone de swash est le siège de transports sédimentaires intenses. Les sédiments sont transportés en général par 'sheet flow', sur fond plat. Le 'sheet flow' désigne un écoulement très concentré ($C > 5\%$, C étant la concentration volumique en sédiments) où les interactions entre particules (effets des collisions, vitesse de chute entravée...) sont importantes.

Les formules classiques qui permettent de calculer le taux de transport en fonction des paramètres hydro-sédimentaires, peuvent en général être étendues pour être appliquées à la zone de surf. Il faut alors tenir compte de l'effet du déferlement par une augmentation des contraintes exercées par l'écoulement sur le fond.

Ces formules ne sont en général pas valables dans la zone de swash. On est alors en présence d'un milieu triphasique extrêmement complexe, et les effets d'inertie sont par ailleurs importants.

Granulométrie étendue

On observe en général un raffinement des sédiments dans la direction offshore. Les sédiments les plus grossiers sont concentrés vers le haut de plage, à la limite entre la zone de swash et la zone de surf, et les sédiments les plus fins sont transportés vers le large ('offshore').

Formes de fond

Comme dans la zone de surf, les vitesses oscillatoires sont intenses et les rides sont effacées. Cependant, on assiste parfois à la reformation des rides dans la partie extrême à l'aval de la zone de swash, lorsque l'énergie de la houle a été dissipée. Il peut y avoir aussi localement formation d'antidunes, lorsque l'écoulement devient super-critique au cours du 'run-down'.

Effets des mouvements verticaux

Les vitesses verticales sont généralement faibles devant les composantes horizontales. Cependant, on observe fréquemment des ruptures de pente en bordure amont de la zone de swash. Ces formes de fond sont typiquement rencontrées pour des plages composées de sable relativement uniforme. On observe alors la formation de vortex générés à l'aval (côté 'offshore') durant l'épisode de 'run-down'. Ces vortex sont associés à des taux de transport importants. Seuls les matériaux les plus grossiers peuvent se déposer par 'avalanche'.

3.2. Transport net

Sources d'asymétrie

Le transport net résulte d'un bilan entre les quantités de sédiments transportés 'onshore' pendant le 'run-up' et 'offshore' pendant le 'rundown'. On considère les différentes sources d'asymétries suivantes :

- les vitesses et les cisaillements sont plus intenses au cours du 'run-up',
- la durée du 'run-down' est allongée par rapport à celle du 'run-up',
- l'effet de pente : les sédiments sont plus facilement déstabilisés et mis en mouvement dans le sens de la pente. L'effet de pente favorise donc le transport de sédiments dans la direction 'offshore' et joue un rôle stabilisateur dans la direction 'onshore'.
- les forces de portance supplémentaires, induites lors du 'run-down' par les phénomènes de percolation. Ces effets sont similaires à ceux de l'effet de pente et ont tendance à favoriser la mise en mouvement des sédiments au cours du 'run-down', et stabilisent les sédiments au cours du 'run-up'. Ils favorisent un transport net dirigé 'offshore'. Cet effet est d'autant plus important que les sédiments sont plus grossiers.

Transport net

En règle générale, on considère qu'en période de beau temps et pour des pentes modérées ou fortes, l'asymétrie des ondes gravitaires (haute-fréquence) génère un transport net dans la direction 'onshore': la plage est alors en construction. Les ondes basse-fréquence génèrent quant à elles un transport net dans la direction 'offshore', et ces conditions prédominent lorsque la zone de surf est saturée, i.e. pour des houles modérées à fortes et des pentes relativement faibles. La plage se trouve alors en déficit.

Effet des courants moyens

Le transport littoral dans la zone de swash a été relativement moins étudié que celui de la zone de surf, mais peut représenter jusqu'à 50% du transport littoral total.

Les 'rip-courants' génèrent un transport net des sédiments dans la direction 'offshore'. Ils sont responsables de la formation de sillons plus profonds, orientés normalement à la plage et se manifestent par des oscillations 'longshore' du trait de côte ('beach-cusps').

4. Etat de l'art en modélisation

4.1. Zone de surf

En règle générale, les modèles morphodynamiques classiques peuvent être adaptés pour modéliser les évolutions 'cross-shore' ou 'longshore' dans la zone de surf. La modélisation repose en général sur un couplage entre différents modules,

- un code de propagation de houle,
- un code bi-dimensionnel ou tri-dimensionnel de courantologie,
- un module de transport sédimentaire.

Modélisation hydrodynamique

Différents types de modèle peuvent être appliqués pour modéliser la propagation de la houle depuis le large jusque dans la zone de déferlement. Dans les modèles à grande échelle (ex le code TOMAWAC du système TELEMAC), la houle est en général représentée par son spectre d'énergie directionnel, défini par une hauteur et une période (ainsi qu'éventuellement d'autres paramètres). Le déferlement de la houle est paramétré par le biais d'un terme de dissipation supplémentaire dans l'équation de l'énergie de la houle.

Le calcul de la houle doit être couplé à un code courantologique 2D pour tenir compte de la marée et calculer les courants moyens générés par la houle. Le couplage entre les codes de houle et de courant s'effectue en plusieurs étapes successives, de la manière suivante:

1. un premier calcul de marée est réalisé sans tenir compte de la houle,
2. le calcul de la houle relit les résultats du calcul de marée, et tient compte à la fois de la variation du niveau moyen et des courants,
3. le calcul de marée est réitéré en tenant compte des termes de forçage supplémentaires dus aux contraintes de radiation.

La comparaison des calculs 1 et 3 permet de calculer les variations du niveau moyen dues au 'set-up', ainsi que la composante 'longshore' du courant généré par la houle. Cette approche a été mise en œuvre par Villaret et al. (2003) pour calculer les courants littoraux et le transport littoral générés dans le cas schématisé d'une houle oblique et d'une plage rectiligne. A noter que la composante 'cross-shore' du courant de houle ou 'undertow', ne peut être prise en compte que dans une approche 3D ou quasi-3D (voir Zyserman et Johnson, 2002).

Les modèles dits 'intra-wave' donnent des détails sur la variation dans le temps, au cours d'une période de la houle, des profils de vitesse instantanée. Les modèles classiques de fermeture turbulente peuvent être adaptés pour tenir compte des termes de production supplémentaires à l'intérieur du rouleau de déferlement.

Modélisation morphodynamique

Les modèles morphodynamiques classiques utilisent des formules de transport solide pour calculer les taux de transport en tous points du domaine, en fonction des caractéristiques de la houle, de l'intensité des courants et des paramètres sédimentologiques (diamètre et vitesse de chute). L'évolution du fond est calculée en fonction de la divergence du taux de transport.

EDF R&D LNHE	Etude bibliographique des processus hydro-sédimentaires de la zone de swash	HP-75/03/030/A Page 20/24
----------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	------------------------------

Un certain nombre de ces formules de transport solide ont été validées pour des houles linéaires et peuvent être utilisées dans la zone de surf. Par exemple, Villaret (2000) ainsi que Camenen et Larroude (2003) proposent de faire varier le coefficient de proportionnalité de la formule de Bijker (1992) pour tenir compte de l'augmentation de la turbulence et du taux de transport par le déferlement.

Le frottement exercé par l'écoulement sur le fond est un paramètre essentiel qui gouverne la dynamique sédimentaire. Il est lui-même sensible au paramètre de rugosité qui représente les formes de fond. En bordure de la zone de surf et pour des houles modérées, on observe la formations de rides à l'équilibre, i.e. dont les dimensions sont proportionnelles à l'excursion orbitale sur le fond. Après déferlement, ces rides disparaissent et le transport s'effectue sur fond plat par 'sheet flow'. Les rides réapparaissent ensuite vers le haut de plage, dans la zone de swash, lorsque l'énergie de la houle s'est dissipée. Ces variations des formes de fond à travers la zone de surf ont un effet important sur le taux de transport. Ces effets sont discutés dans Davies et Villaret (2003).

Dans une modélisation bi-dimensionnelle, on suppose que le taux de transport est dirigé dans le sens de propagation du courant moyen. Il en résulte un transport nul dans la direction offshore, puisque le courant de retour compense le flux de masse dû au rouleau. L'approche bidimensionnelle ne peut donc être utilisée que pour modéliser les évolutions 'longshore' et non les évolutions 'cross-shore' du profil de plage.

Zyserman et Johnson (2002) proposent une utilisation quasi-3D de leur modèles morphodynamiques, pour tenir compte du courant de retour et calculer les évolutions 'cross-shore'. Cette approche consiste à calculer la propagation de la houle et des courants par une approche 2D. En tous points du domaine, le taux de transport et sa direction sont calculés par un modèle 1DV (modèle STP) qui tient compte de l'interaction entre la houle et le courant, et de l'effet du courant de retour. Les résultats d'une approche 2D et quasi-3D sont comparés dans le cas d'un brise-lame

4.2. Zone de swash

Modélisation des processus

Les interactions entre particules, bulles d'air et l'écoulement rendent extrêmement complexe une modélisation multiphasique des phénomènes. Le code SPARTACUS du système TELEMAC, basé sur la méthode particulaire SPH, a été récemment adapté pour modéliser le 'run-up' et les résultats obtenus ont été comparés avec des résultats expérimentaux. L'effet des bulles d'air n'a pas été pris en compte dans cette approche. Ces travaux sont encore en cours et décrits dans le *newsletter* de l'AIRH (bulletin de février 2003).

Une approche simplifiée a été proposée par Karambas et Koutitas (2002) pour reproduire les processus hydro-sédimentaires dans la zone de swash : la propagation de la houle est modélisée par une équation de Boussinesq non-linéaire, qui se réduit à une équation d'ondes longues dans la zone de swash. Le modèle permet de reproduire la dissipation d'énergie turbulente lors des épisodes de 'run-up' et de 'run-down', grâce à l'utilisation d'un coefficient de viscosité artificielle. Le modèle hydrodynamique est couplé à une équation d'évolution des fonds avec prise en compte de l'effet de pente suivant la méthode de Watanabe et Dibajnia (1997). Cet effet est en effet primordial dans la zone de swash, car le transport gravitaire dirigé 'offshore' permet de contrebalancer le transport dirigé 'onshore' sous l'action d'une houle asymétrique. On suppose ensuite que, dans la zone de swash, le transport s'effectue par 'sheet flow' à l'intérieur d'une sous-couche collisionnelle (fond plat). Le taux de transport solide, généré par une houle asymétrique est calculé par la formule de Dibajnia et Watanabe (1992), qui permet de tenir compte des effets instationnaires.

Modèles comportementaux

Pour les applications, une approche comportementale des phénomènes est possible. Des modèles d'ingénieurs, tels que le modèle SBEACH développé et commercialisé par l'US Army corps of Engineers, modélise les évolutions morphodynamiques dans la zone de surf et dans la zone de swash. La formulation repose sur l'existence d'un profil d'équilibre, et tient compte des phénomènes de glissement de terrain. Les résultats obtenus sont cependant très sensibles à la valeur retenue pour les différents coefficients empiriques.

Un modèle similaire a été développé au LNHE, pour modéliser en particulier la formation de barres offshore (Jamois et Benoit, 2002). Les échanges éoliens interviennent et doivent être pris en compte dans la formulation (Villaret et al., 2003).

5. Conclusions

Cette étude bibliographique a été réalisée dans le cadre de la Convention Biparti EDF-Ministères. Ce rapport présente une description des processus hydro-sédimentaires qui gouvernent la zone de swash, et déterminent les évolutions morphodynamiques de la plage et du trait de côte.

La zone de swash est caractérisée par un niveau de turbulence intense et des transports sédimentaires importants. L'hydrodynamique de la zone de swash est largement déterminée par les conditions de déferlement à l'amont, ainsi que la présence éventuelle d'ondes longues. Le transport s'effectue par 'sheet flow' sur fond plat, et le transport net est dû à différentes sources d'asymétrie entre les épisodes de 'run-up' et de 'run-down', ainsi qu'à la présence éventuelle de courants moyens (courant littoral ou jet de rive).

Nous abordons ici aussi le problème de la modélisation. Les modèles qui sont utilisés pour calculer la houle, les courants et le transport sédimentaire en zone côtière, peuvent généralement être étendus à la zone de surf, en tenant compte de la dissipation d'énergie supplémentaire à l'intérieur du rouleau de déferlement et des contraintes de radiation. Dans la zone de swash, les modèles classiques ne permettent pas de reproduire les processus complexes d'interaction entre la houle, les courants et les sédiments. Il faudrait aussi tenir compte aussi de l'effet des bulles d'air et des échanges avec la nappe souterraine. Une approche diphasique, voir triphasique, serait nécessaire pour aboutir à une description détaillée des processus. Cependant, il est possible d'étendre les modèles de propagation de la houle de type Boussinesq à la zone de swash. Cette approche simplifiée, utilisée par Karambas et Koutitas (2002), permet de représenter de manière satisfaisante les épisodes de 'run-up' et de 'run-down', sans tenir compte cependant des phénomènes de percolation. Le modèle hydrodynamique, couplé à un module de transport solide avec prise en compte de l'effet de pente, peut être appliqué pour calculer l'évolution d'un profil de plage dans la zone de swash. La formule de Dibajnia et Watanabe (1992) permet de calculer le taux de transport net généré par une houle asymétrique par 'sheet flow'.

6. Références

- J.A. Battjes, 1974: Surf similarity, *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, pp.1419-1438.
- T.E. Baldock, D.A. Huntley, P.A.D. Bird, T.J. O'Hare, G.N. Bullock, 2000 : Breakpoint generated surf beat induced by bichromatic wave groups, *Coastal Eng.* 39, 213-242.
- E.W. Bijker, 1992. Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current, In Design and Reliability of Coastal Structures, *23rd Int. Conf. on Coastal Engineering*, 147-173.
- A.J. Bowen, D.L. Inman, 1971 : Edge waves and crescentic bars, *Journal of Geophysical Research*, 76, 8662-8671.
- B. Camenen, P. Larroudé, 2003: Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment, *Coastal Engineering*, 48, pp. 111-132.
- A.G. Davies, C. Villaret, 2003: Sediment transport modelling for coastal morphodynamics, *International Conference on Coastal Sediments*, Mai 2003, Floride, *Rapport EDF-LNHE HP-75/03/29*.
- Dibajnia M., Watanabe A., 1992: Sheet flow under non-linear waves and currents, *Proc. Intl. Conf. on Coastal Eng.*, 2015-2029.
- E.D. Christensen, D.J. Walstra, N. Emerat; 2002: Vertical variation of the flow across the surf zone, *Coastal Engineering (45)* 127, pp149-168.
- E. Crehalet, D. Aelbrecht, T. Denot, 2001: Mast III-SASME project '3D wave-driven currents and morphodynamic modelling around a groin system'. *Rapport EDF-LNHE HP-75/2001/031/A*.
- B. Elfrink, T. Baldock, 2002: Vertical variation of the flow across the surf zone, *Coastal Engineering (45)* 127, pp149-168.
- R.T. Guza, E.B. Thornton, 1982: Swash oscillations on a natural beach, *Journal of Geophysical Research* 87 (C1), 483-491.
- C.R. Iribarren, C. Nogales, 1949: Protection des ports, Sec.2, comm4, 17th Int. Nav. Cong., Lisbon, p.31-80.
- E. Jamois, M. Benoit, 2002: Evolution de profils de plage sous l'action de houles de tempête. Développement du code morphodynamique PLAGÉ. Etablissement du modèle et guide d'utilisation, *Rapport EDF-LNHE HP-75/02/064/A*.
- T. Karambas, C. Koutitas, 2002 : Surf and Swash Zone Morphology Evolution Induced by Nonlinear Waves, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.128, N°3.
- G. Klopman, 1998 : Vertical structure of the flow due to waves and currents, WL, delft Hydraulics Report H840.30 Part II.
- S. Longo, M. Petti, J.S. Losada, 2002: Turbulence in the swash and surf zones: a review *Coastal Engineering (45)* 127, pp129-148.
- M.S. Longuet-Higgins, 1953 : Mass transport in water waves, *Philos. Trans. R. Soc. London*, Ser A 245, 535-581.

- M.S. Longuet-Higgins, 1970 : The mechanics of the surf zone, *Philos. Trans. R. Soc. London*, (Cambridge UK)
- M.S. Longuet-Higgins, R.W. Stewart, 1962 : Radiation stress and mass transport in water waves, with applications to surf beat, *Journal of Fluid Mechanics* 13, pp.481-504.
- M.S. Longuet-Higgins, R.W. Stewart, 1964 : Radiation stress and mass transport in water waves: a physical discussion with application, *Deep Sea Research* 11, pp.529-562.
- R. Miche, 1951 : Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de la houle, *Ann. Ponts et Chaussées* 121, pp.285-319.
- C. Villaret, M. Benoit, C. Machet, 2003 : Modélisation hydrosédimentaire en zone littorale : Programme de développement au LNHE, Présentation aux Journées Techniques du CETMEF, Paris, mars 2003 , *Rapport EDF-LNHE HP-75/03/25*.
- C. Villaret, 2002 : Modélisation du transport solide par la formule de Bijker, Etude de sensibilité et tests de validation, *Rapport EDF-LNHE HP-75/2001/66*.
- Watanabe A., Dibajnia M., 1997 : Mathematical models for waves and beach profiles in surf and swash zones, *Proc. Intl. Conf. on Coastal Eng.*, 3104-3114.
- J.A. Zyserman, HK Johnson, 2002: Modelling morphological processes in the vicinity of shore-parallel breakwaters, *Coastal Engineering* (45) 127, pp. 261-284.