

# PROBLEMES HYDRAULIQUES DE L'INTERACTION DE LA HOULE SUR LE COURANT DANS LES OUVRAGES DE REJET ET DES PRISES D'EAU EN MER

Par  
 Mustapha Kamel MIHOUBI  
 Magister, Maître Assistant, ENSH (\*)  
 Mohamed HASSANE  
 PhD, Chargé de Cours, ENSH

## Résumé

*Le présent article traite un des problèmes que rencontrent souvent les concepteurs hydrotechniciens dans les projets de construction des centrales thermoelectriques, où une attention particulière doit être accordée au calcul hydraulique de l'ouvrage de rejet en mer. L'influence de la houle et de son action combinée à l'écoulement conditionne la stabilité des ouvrages hydrotechniques ainsi que l'érosion du fond dans la zone de rejet.*

**Mots clés :** houle • lame debout • courant de marée • longueur du fetch effective • ondes gravitiques • célérité de groupe • déferlement • blocage • hauteur significative.

## 1 INTRODUCTION

L'étude de la houle et son influence sur le courant de rejet en mer conserve toute son actualité, d'autant plus que notre pays dispose d'une frange littorale de plusieurs centaines de kilomètres et de grands sites urbains et complexes industriels de grande envergure, stratégiques pour l'économie de notre pays, nécessitant des quantités considérables d'eau et d'énergie électrique.

Les projets de construction de centrales électriques et nucléaires projetés sur le littoral posent des problèmes naturels majeurs de calcul des prises d'eau et des ouvrages de rejet en mer. Tant que la transformation de l'énergie électrique passera par l'énergie mécanique,

il sera difficile de se libérer du cycle Carnot [1].

Cependant dans le cas des prises d'eau ou ouvrages de rejet en mer, où les phénomènes de la houle jouent un rôle essentiel, la recherche de méthodes hydrauliques de calcul est indispensable, tant pour le canal d'aménée que pour les éléments de son raccordement avec l'aval. Ces méthodes doivent prendre en considération les courants littoraux dans la zone d'influence de prise d'eau ou de rejet, ainsi que le transport solide par charriage et suspension.

Dans le présent article on s'intéresse à la question des courants, de la houle et de leur interaction dans les calculs des ouvrages de rejet en mer. L'influence de la houle et de son action combinée à l'écoulement conditionne la stabilité de ces ouvrages hydrotechniques ainsi que l'érosion du fond dans la zone de rejet.

Toutefois, les paramètres de la houle se déterminent non seulement par les conditions hydrométéorologique et topographique du fond, mais aussi par les courants dans la zone d'influence de l'ouvrage qui sont d'origine superficielle, littorale et de marée. Les courants opposés peuvent accroître de deux fois et plus la hauteur de la houle, ainsi des effets de déferlement et de blocage de la houle peuvent avoir lieu.

Les travaux menés par E.I Mass et I.G Kantarji [2], [3] ont fait l'objet d'une étude détaillée, traitant un large ensemble de problèmes de la houle et des courants du point de vue hydrotechnique. Dans le cas de génération des ondes de surface provoquées par le vent sur un plan d'eau non limité et en l'absence de

(\*) Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida.

courant, il existe des relations définissant les nombres adimensionnels tels que la longueur du fetch et la profondeur, vérifiées par les données de nature de la forme :

$$\frac{gH_{moy}}{W^2}, \frac{gT_{moy}}{W}, \left( \frac{gX}{W^2}, \frac{gd}{W^2} \right) \quad (1)$$

- $H_{moy}$  : hauteur moyenne de la houle,
- $W$  : vitesse de calcul du vent,
- $T_{moy}$  : période moyenne, correspondant à la fréquence du spectre,
- $d$  : profondeur d'eau,
- $X$  : longueur du fetch.

## 2 INTERACTION DE LA HOULE SUR UN COURANT DE MAREE

Pour la génération de la houle sur un courant de marée, un nouveau facteur déterminant apparaît. Il est représenté sous forme de vitesse adimensionnelle du courant,  $\frac{u}{W}$ . Ce facteur influe sur la longueur effective du fetch, qui se détermine comme étant le rapport des temps d'interaction du vent et de la surface agitée par la houle en présence du courant, sur le temps d'interaction et ce en l'absence du courant [2].

$$\frac{X_{eff}}{X} = \frac{\int_0^X \frac{dx}{C_{ga}(x)}}{\int_0^X \frac{dx}{C_{gs}(x)}} \quad (2)$$

- $X_{eff}$  : longueur du fetch effective due au courant de marée,
- $C_{ga}(x)$  : célérité moyenne de groupe en présence du courant,
- $C_{gs}(x)$  : célérité moyenne de groupe absolue en eau statique (absence du courant).

Les figures 1 et 2 représentent les abaques de calcul de  $\frac{X_{eff}}{X}$  en fonction de  $\frac{u}{W}$  et de  $\frac{gX}{W^2}$ .

Pour les courants contraires (défavorables)  $\frac{X_{eff}}{X} > 1$ , l'amplitude et la longueur d'onde sont plus grandes comparativement au cas d'eau statique.

Pour les courants favorables  $\frac{X_{eff}}{X} < 1$ , les ondes générées sont plus petites comparativement au cas d'absence de courant.

L'application de la relation (2) est basée sur le modèle d'analyse de l'équation de la variation de la densité ondulatoire, qui s'écrit pour la houle sur un courant stationnaire graduellement varié sous la forme [3] :

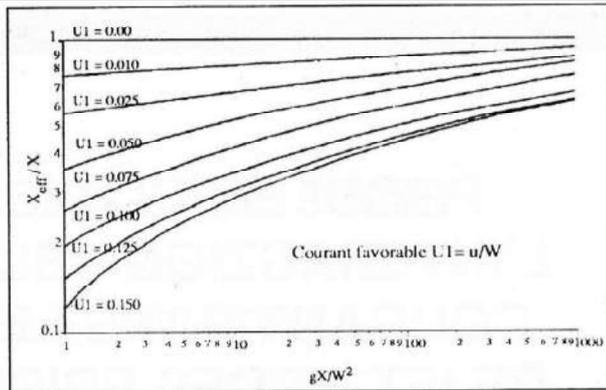


Figure 1 : Abaque de détermination de  $X_{eff}/X$  (cas de courant favorable).

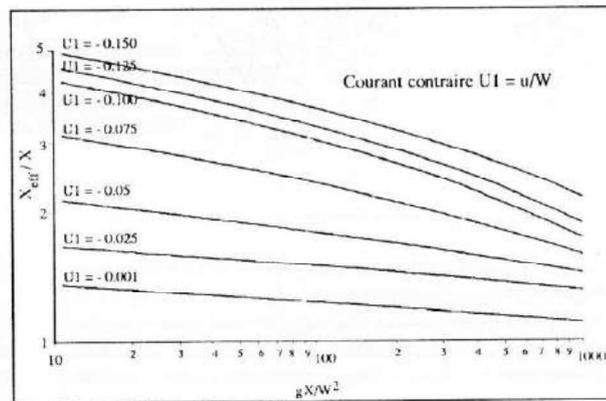


Figure 2 : Abaque de détermination de  $X_{eff}/X$  (cas de courant contraire).

$$\frac{\partial l(x,k)}{\partial x} C_{ga} = S \quad (3)$$

- $l(x,k)$  : densité spectrale de l'action ondulatoire,
- $C_{ga}$  : célérité absolue de groupe d'onde  $k$ ,
- $S$  : fonction de source, déterminant le transfert d'énergie de la houle de vent à la surface agitée, c'est-à-dire la dissipation et les interactions non linéaires.

Effectuons la transformation suivante dans (3) :

$$\frac{X_{eff}}{X} = \frac{C_{ga}}{C_{go}} \quad (4)$$

Ainsi, pour chaque composante spectrale nous obtenons la relation suivante :

$$\frac{\partial l(x,k)}{\partial x} C_{go} = S' \quad (5)$$

où  $S'$  est une fonction de source, obtenue après transformation de  $S$ .

Si on pose  $S' = S_0$ , cas correspondant à une fonction source en l'absence de courant, l'équation (5) coïncide alors avec l'équation de variation de la densité de l'action ondulatoire en l'absence du courant.

$$\frac{\partial f_0}{\partial x} C_{g0} = S_0 \quad (6)$$

De la sorte, la transformation (4) permet de modéliser le processus de génération de la houle sur le courant et de la houle de vent (houle irrégulière) sur l'eau statique.

A cet effet, des expériences à grande échelle ont été réalisées dans l'aérohydro-canal [5], montrant la relation existante entre la fréquence du maximum spectral de la houle de vent  $f_{o(m)}$  et la hauteur significative ( $H_s = H_{30\%}$ ). Dans la section, des développements peuvent être formulés par les approximations suivantes, dans le cas d'une profondeur infinie.

$$\frac{W^* f_{o(m)}}{g} = 0.939 \left( \frac{g X_{\text{eff}}}{W^{*2}} \right)^{-0.354} \quad (7)$$

$$\frac{g H_s}{W^{*2}} = 0.022 \left( \frac{g X_{\text{eff}}}{W^{*2}} \right)^{0.669} \quad (8)$$

$W^*$  : vitesse de frottement du vent.

Les deux relations précédentes sont satisfaisantes pour le vent, les courants favorables et opposés ainsi que pour les conditions d'eau statistiques. Ce résultat confirme en même temps l'exactitude des expériences qui valide la supposition  $S' = S_0$  prise sans démonstration. Dans le cas d'une profondeur finie, nous aurons :

$$\frac{g H_{\text{moy}}}{W_{10}^2} = 0.0017 \frac{g X_{\text{eff}}}{W_{10}^2} \text{th} \left[ 84.7 \frac{\left( \frac{g d}{W_{10}^2} \right)^{0.945}}{\left( \frac{g X_{\text{eff}}}{W_{10}^2} \right)^{0.669}} \right] \quad (9)$$

$H_{\text{moy}}$  : hauteur moyenne de la houle,

$W_{10}$  : vitesse théorique du vent mesurée à dix mètres de hauteur au dessus du plan d'eau de mer (eaux calmes).

### 3 INTERACTION DE LA HOULE ET DES COURANTS DE REJET

#### 3.1 Approche théorique

Dans le cas d'un canal ou d'un estuaire étroit le facteur influant sur la génération de la houle est la largeur limitée du canal. La résolution correspondant à ce cas est obtenue par l'introduction d'une nouvelle fonc-

tion du fetch effective déterminée par la relation (10) [2].

$$\frac{\phi}{X} = \frac{\int_0^{\theta'} P(\theta) X'(\theta) d\theta}{\int_0^{\theta'} P(\theta) X(\theta) d\theta} \quad (10)$$

$X'$  : longueur du fetch pour le cas considéré,

$P(\theta)$  : fonction de pondération, déterminée par l'efficacité de production de la houle de vent agissant sous l'angle d'incidence  $\theta$  par rapport à l'axe du canal,

$\phi$  : longueur du fetch effective due à l'action combinée houle-courant,

$\theta$  : angle d'incidence du vent par rapport à l'axe du canal,

$\theta'$  : valeur du secteur dans lequel le vent est efficace.

En particulier, pour  $\theta' = \pi/6$  (comme condition aux limites) et  $P(\theta) = 1$ , de la relation (10) découle l'expression suivante :

$$\frac{\phi}{X} = \frac{6}{\pi} \left[ \ln \left( \text{tg} \frac{1}{2} \arctg \frac{b}{2X} + \frac{\pi}{4} \right) - 1.317 \frac{b}{2X} - \frac{b}{2X} \ln \left( \text{tg} \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{b}{2X} \right) \right) \right] \quad (11)$$

$b$  étant la largeur du canal.

La largeur limitée du canal ou de l'estuaire, communiquant l'écoulement dans ce dernier, influe sur la génération de la houle de vent. Sur la base de l'utilisation du facteur longueur effective du fetch, la méthode de prévision des paramètres de la houle vérifiée par M. Hassane [4], a montré que les résultats expérimentaux concordent bien avec ceux obtenus avec cette méthode.

Nous entamons notre étude par l'analyse des problèmes de l'approche frontale de la houle sur le rejet symétrique, ce qui nous ramène dans cette analyse à un problème unidimensionnel. Le problème posé dans ce cas est le calcul du champ des vitesses dans le jet en l'absence de la houle. Pour ce type de calcul, un ensemble de relations classiques peut être utilisé [3], [4] notamment :

$$U_{\text{moy}}(x) = \frac{\text{Const}}{\sqrt{y}} \quad (12)$$

$y$  : distance par rapport à l'origine du jet,

$U_{\text{moy}}(x)$  : vitesse moyenne dans l'axe du jet.

Dans le cas de raccordement de l'ouvrage de rejet avec le plan d'eau par un talus de pente  $\text{tg} \alpha = 1/m$ , il est plus commode d'utiliser la relation ci-après [4] :

$$\frac{U_{\text{moy}}(x)}{U_0} = 6.4 \frac{d_0}{y+a} \quad (13)$$

$U_0$  : vitesse à la sortie du jet,  
 $d_0$  : profondeur initiale du courant de rejet.  
 $a = md_0$ .

Un courant opposé a gradient de vitesse longitudinal négatif, de même que la diminution de la profondeur à l'entrée du bassin d'eau, entraîne un accroissement de la hauteur et une diminution de la longueur d'onde de la houle. Ce phénomène peut être bien exprimé par les résolutions de l'approximation adiabatique [5].

La diminution de la célérité de groupe et l'accroissement de la cambrure de la houle lors de sa propagation sur le courant opposé peut aboutir à un effet particulier de blocage ou d'arrêt ou bien de déferlement de la houle, qui se détermine par la relation :

$$C_{ga} = U + C_g^- \quad (14)$$

Au voisinage des points correspondant à la condition citée ci-dessus (14), la résolution adiabatique n'est pas applicable pour la détermination approximative de la hauteur de la houle aux alentours du point de blocage. Cependant, on peut obtenir des estimations par l'intégrale d'Airy :

$$\frac{H_{(max)}}{H_0} = \left( \frac{\omega}{4 |\partial U / \partial x|} \right)^{1/2} \quad (15)$$

où :

$H_{(max)}$  : hauteur maximale dans la zone de blocage,  
 $U$  : vitesse orbitale des particules,  
 $\omega$  : pulsation absolue ( $\omega = 2\pi/T$ ),  
 $H_0$  : hauteur de la houle au large.

### 3.2 Résultats des expériences

Une série d'expériences concernant la propagation d'ondes gravitiques sur des courants opposés horizontaux-hétérogènes a été effectuée dans un bassin de houle (Figure 3) [4], [7]. La variation des vitesses des courants a été obtenue grâce à des parois supplémentaires convergentes, installées dans le bassin de houle. Les résultats expérimentaux obtenus sont portés sur les figures 4 et 5.

La position des points de blocage de la houle correspond bien à la condition (14). Les hauteurs de la houle aux alentours du point de blocage ont augmenté de deux fois environ comparativement à la hauteur de houle initiale. Au delà de la zone de blocage les ondes de surface étaient pratiquement dissipées. Le blocage de la houle était toujours suivi du brisement de ses ondes.

Il a été aussi constaté lors des expériences que le train d'onde secondaire, né après le déferlement, est brusquement bloqué par le courant opposé. Ainsi, pour des houles réelles gravitiques considérées dans le cal-

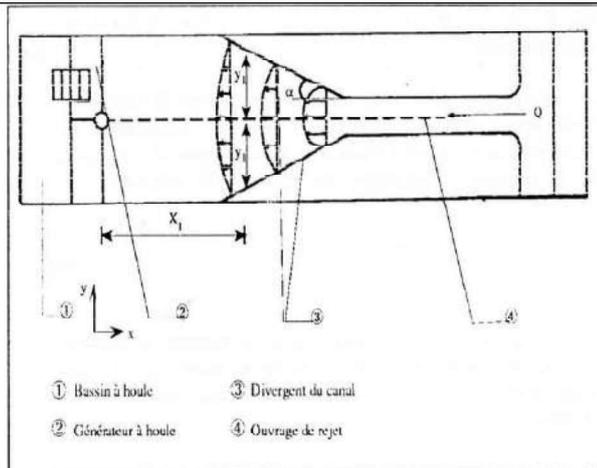


Figure 3 : Modèle expérimental avec la représentation des épures de vitesses.

cul des ouvrages hydrotechniques, le blocage et le déferlement par le courant contraire sont étroitement liés.

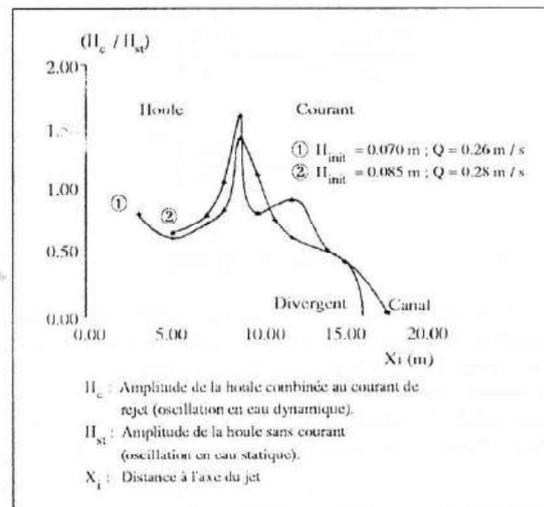


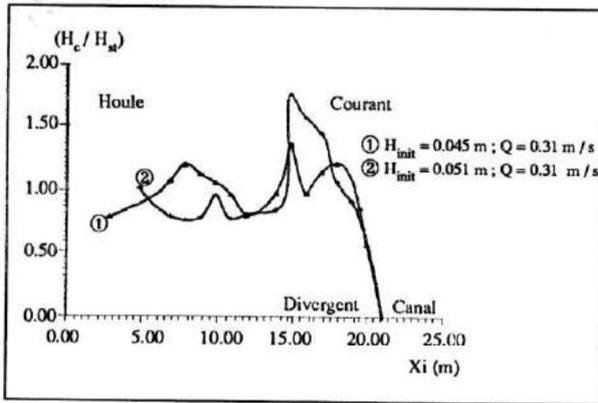
Figure 4 : Transformation de l'amplitude de la houle par les courants de rencontres dans un canal divergent.

Pour les conditions suivantes :

$\alpha = 7^{\circ} 00'$  : angle du divergent à la sortie du canal,  
 $d = 0.35$  m : tirant d'eau dans le canal,  
 $T = 1.10$  s : période des oscillations.

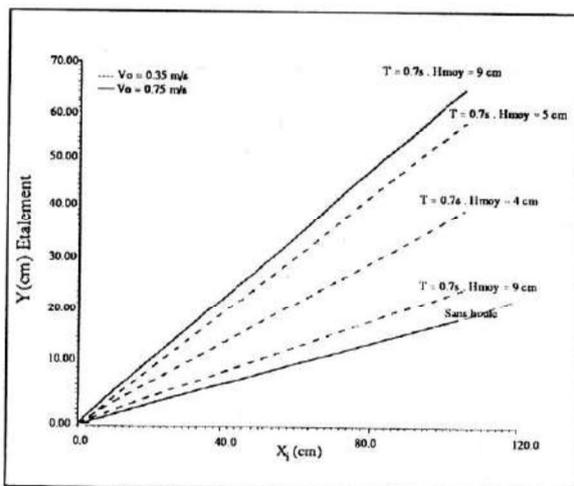
L'influence inverse de la houle sur le jet opposé entraîne l'accroissement de l'angle d'étalement du jet dans le plan et la diminution des vitesses longitudinales.

La figure 6 représente un exemple de résultats obtenus pour des vitesses de jet et des angles d'étalement pour différentes valeurs de hauteurs et de périodes de lames.



**Figure 5 :** Transformation de l'amplitude de la houle par les courants de rencontres dans un canal divergent.  
Pour les conditions suivantes :  
 $\alpha = 22^\circ 00'$ ,  $d = 0.35$  m et  $T = 1.10$  s

Nous avons toutes les raisons de croire que les résultats du présent article permettront dans le futur de formuler un ensemble de méthodes de calculs hydrauliques de rejet et de prise d'eau en mer.



**Figure 6 :** Courbes d'étalement du jet sous l'action de la houle pour les conditions  $m = 0$  et  $d = 0.06$  m.

#### 4 CONCLUSION

De l'analyse des résultats obtenus, on peut conclure que l'action simultanée des courants sur les ondes crée des perturbations sur la répartition des vitesses suivant une section plane.

De plus, les paramètres caractéristiques de la houle doivent être déterminés en tenant compte de ces perturbations, qui sont incontestablement primordiales au choix des normes de dimensionnement des ouvrages de génie civil des aménagements maritimes.

A cet effet, il y a lieu de prendre en considération les effets de blocage, de déferlement et les phénomènes de réfraction, dans le but de projeter des variantes fiables, répondant aux critères du site et de fonctionnement de l'ouvrage de rejet.

La présence des courants de rejet sur le littoral influe énormément sur le régime du transport sédimentaire, qui résulte du blocage et de l'arrêt d'onde près de la zone influencée par le rejet. Ceci entraîne, d'une part, une instabilité de l'ouvrage de génie civil, et, d'autre part, des érosions causées par la perturbation du régime du transit littoral dans le voisinage immédiat de l'aménagement.

Nous pensons que les résultats de ce présent article permettront dans le futur de formuler un ensemble de méthodes de calculs hydrauliques de rejets de prises d'eau en mer [7]  $\bullet$

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Bellin & P. Vannetezel : "Problèmes des prises d'eau et des ouvrages de rejet en mer des centrales nucléaires de grande puissance". Houille blanche, N° 7/8, 1975.
- [2] E.I Masse & I.G Kantarji : "Méthode hydraulique de la houle sur les courants". Brochure «Protection du rivage» MTNIIS, en Russe, 1979.
- [3] E.I Masse & I.G Kantarji : "Houle sur un courant stationnaire en profondeur finie". Revue Ressources en eau N°1, en Russe, 1988.
- [4] M. Hassane : "Méthode de prévision des éléments de la houle dans la zone de rejet en mer". Thèse de PhD, Moscou, 1987.
- [5] H. Kato & H. Tsuruya : "Expérimental study of wind waves generated on current". Pro, 16th cost eng conf, vol 1, 1979.
- [6] I.G Kantarji : "Hydraulique de la houle de vent à profondeur finie". S/R de Masse EIGTOU, Tbilissi, en Russe, 1984.
- [7] M.K Mihoubi : "Approche méthodologique de l'interaction de la houle et des courants de rejets en mer". Thèse de Magister, ENSH, 1995.