وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER

Sujet :

État de l'art sur les différentes méthodes d'étude du Run-up et Run-Down des vagues à la côte

Présenté par:

- **G**HOUTI **M**ohamed **A**mine

Soutenu devant le jury suivant :

Mme MAHDID. S	Maître de conférences (ENSSMAL)	**Présidente**
Mr HEMDANE. Y	Maître de conférences (ENSSMAL)	**Promoteur**
Mr BELKESSA. R	Maître de conférences (ENSSMAL)	**Examinateur**
Mr GUERFI. M	Maître de conférences (ENSSMAL)	**Examinateur**

Promotion : (2012)

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à ceux qui, à divers titres, ont collaboré à la réalisation de ce travail. Nous les devons à de nombreuses personnes que nous avons le plaisir et l'honneur de citer ci-après.

Mr, HEMDENE Yacine avoir dirigé ce travail et lui avoir accordé un intérêt tout au long de son élaboration.

Nous tenons à remercier :

Mme, MAHDID Sonia d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.

Mr, BELKESSA Rabah nous avoir honoré de sa présence, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mr, GUERFI Mokhtar on le remercie d'avoir accepté examiner notre travail.

GHOUTI Mohamed Amine

Sommaire

Sommaire

Introduction……1

Chapitre I : Généralité

I. Cadre générale 2

I.1 Introduction 2

I.2.1 run-up et run-down (wave run-up, wave run-down) de la houle 2

I.2.2 Franchissement de la houle (wave overtoping) 3

I.2.3 Transmission de la houle 3

I.2.4 Réflexion de la houle 3

I.2.5 Le déferlement de la houle……3

I.2.5.1. Le déferlement en "volute" ou "plongeant" 4

I.2.5.2. Le déferlement frontal ou gonflement 5

I.2.5.3. Le déferlement glissant 5

Chapitre II : Run-up et Run-down

II. Run-up et Run-down 7

II.1. Run-up de la houle 7

II.2. Approche fondamentale du run-up 9

II.2.1. Talus lisses 9

II.2.2. Talus rugueux 11

II.2.2.1. Talus rugueux - facteurs de correction 11

II.2.2.2. Talus rugueux - formules explicites 11

II.2.3. Conditions particulières 14

II.2.3.1. Houle oblique 14

II.2.3.2. Eau peu profonde 15

II.2.3.3. Talus à berme 16

II.2.3.4. Vagues induites par la navigation 18

Sommaire

II.3.1.Run-up dans le cas des ondes sinusoïdales: 22

II.3.3. Comparaison du run-up des ondes solitaires et sinusoïdales 23

II.4. Run-down de la houle.....25

II. 1 Introduction.....26

Chapitre III : Tsunamis et leur simulation à l'aide du logiciel VOLNA

III.2. Cause de Tsunamis :.....26

III.3. Run-up du Tsunamis 27

III.3. Simulation de tsunami à l'aide de VOLNA.....29

Conclusion générale …… 30

Références bibliographiques

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des équations

Liste des figures

Figure 1: Interactions hydrauliques liées à la houle et paramètres dimensionnants CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers 2

Figure 2: Schéma d'illustration d'un franchissement.....3

Figure 3 : Schéma d'illustration d'un transmition 3

Figure 4:Profils longitudinaux des quatre types de déferlement (échelles différentes). Les flèches indiquent le point initial du déferlement. (d'après C.J.Galvin /1968/). 4

Figure 5: Déferlement plongeant.....5

Figure 6: Déferlement frontal.....5

Figure 7: Déferlement glissant. 6

Figure 8: Déferlement à effondrement. 6

Figure 9: Run-up relatif sur des talus en enrochement en fonction de la perméabilité du noyau, déterminé à l'aide du paramètre de déferlement calculé à partir des valeurs spectrales de la houle, $\xi_{m-1,0}$, et des Équations 9, 10 et 13. (CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers) 14

Figure 10: Définition d'un angle de talus représentatif, désigné par tan α (CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers).....16

Figure 11: Définition de la largeur de berme, B, utilisée dans l'Équation 18, et de la hauteur d'eau au dessus de la berme, h_B (CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers).....17

Figure 12: Talus à berme (CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers).....18

Figure 13 : Méthodes de calcul du run-up de la houle 20

Figure 14:Run-up dans le cas d'une onde sinusoïdale 21

Figure 15:Run-up des ondes solitaires - données tirées de la littérature sans distinction entre les vagues qui déferlent et celles qui ne déferlent pas ; tracé de l'Equation 24 22

Figure 16: Comparaison du run-up des ondes solitaires et des ondes sinusoïdales 24

Figure 17: Schématisation des paramètres d'étude.....28

Figure 18: Schéma du domaine où se développe le tsunami : en haut, la surface de l'eau et en bas, le sol sous-marin.....29

Figure 19: Schéma du maillage.....30

Figure 20: Évolution d'û en un wave-gage au cours du temps.....31

Liste des figures

Figure 21: Scatterplots : x_3 en fonction de x_1 et x_5 en fonction de x_3. La couleur des points correspond à la valeur de l'amplification du run-up associée, donnée par le dégradé de couleur. 32

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeurs des coefficients A, B et C des Équations 9 et10.....10

Tableau 2: Valeurs du coefficient de réduction de rugosité, γ_f (TAW, 2002) 11

Tableau 3: Coefficients des Équations 11 à 13.....13

Tableau 4: Run-up relatif r/Hd pour un parement lisse 23

Tableau 5: Ru-up pour un parement amont lisse de pente 1/3 23

Tableau 6 : 28

Introduction générale

Introduction générale

Les vagues jouent un rôle fondamental pour de nombreuses problématiques en océanographie physique et disciplines connexes : gestion des zones côtières et des opérations en mer, conception et dimensionnement de structures marines et portuaires telles qu'une digue ou une plateforme pétrolière, étude de la morphodynamiques côtière et de l'évolution du littoral, récupération de l'énergie des vagues, etc. De plus, par leurs effets sur les flux entre l'océan et l'atmosphère, les vagues ont aussi des effets directs ou indirects sur les dynamiques de circulation océaniques et atmosphériques. La connaissance précise et la prévision de la climatologie des états de mer (valeurs moyennes et extrêmes) représentent donc des enjeux importants pour de nombreuses applications.

La connaissance des niveaux extrêmes atteints par les vagues à la côte est très importante pour éviter le risque de franchissement qui peut être induit, lors des événements de forte énergie. Le Run Up et le Run Down sont parmi les paramètres à prendre en considération, durant la phase de dimensionnement des ouvrages côtiers.

Notre travail a pour but de détailler les différentes équations qui permettent d'estimer le Run Up et le Run Down au niveau des infrastructures littorales et éventuellement au niveau des plages.

Ce qui rend ce travail très intéressent son utilité dans plusieurs domaines telle que l'océanographie, l'ingénierie, la protection et l'aménagement côtiers.

Ce présent mémoire intitulé "état de l'art sur les différentes méthodes d'étude des Run Up et Run Down des vagues à la côte" est un mémoire élaboré dans le cadre d'un master en aménagement du littoral, il comprend trois chapitres :

- Premier chapitre : Généralités sur le Run- up et Run-down.
- Deuxième chapitre : Equations de Run_up et Run –down.
- Troisième chapitre : Exemple d'un Phénomène physique étudié : « Tsunamis et leur simulation à l'aide du logiciel VOLNA ».

Chapitre I

Généralité

I. Cadre générale

I.1 Introduction

La connaissance des niveaux extrêmes atteints par les vagues à la côte est très importante pour éviter le risque de franchissement qui peut être induit, lors des événements de forte énergie. Le Run-up et le Run-down sont parmi les paramètres à prendre en considération, durant la phase de dimensionnement des ouvrages côtiers.

Le run-up de la houle est défini comme le niveau maximal que l'eau atteint sur le talus d'un ouvrage du fait de l'action de la houle **(Aristaghes et *al*, 1985).**

Avant d'aborder la formulation mathématique du problème de la houle, Il est en effet bon d'avoir assimilé certaines notions, non seulement pour comprendre la mise en équations des phénomènes, mais aussi pour mieux sentir ce qui est négligé dans les diverses théories **(Aristaghes et *al*, 1985).**

I.2 Interaction entre la houle et les ouvrages maritimes

Les aspects suivants sont traités :

I.2.1 run-up et run-down (wave run-up, wave run-down) de la houle

Wave Run up :

- L'étude de franchissement frontal d'un talus est caractérisé par la hauteur au dessus du niveau d'eau moyen que peut atteindre l'eau des vagues qui se brisent sur la côte.
- La limite supérieure atteinte par les vagues.

Wave Run down : c'est la limite inférieure du ceux des vagues **(figure 1).**

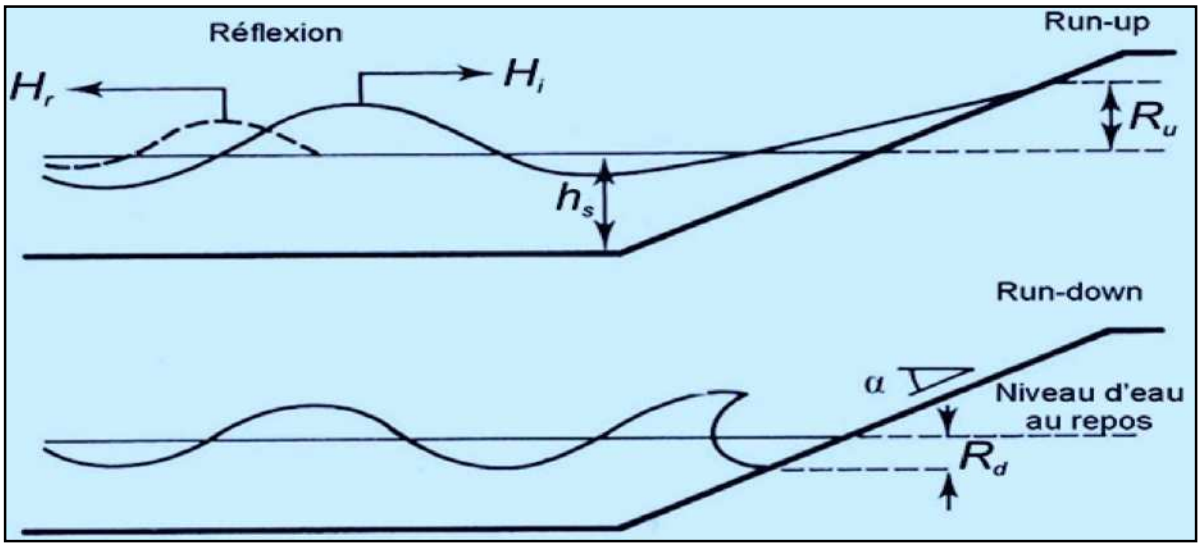

Figure 1: Interactions hydrauliques liées à la houle et paramètres dimensionnant **CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers**

I.2.2 Franchissement de la houle (wave overtoping)

Lorsque les niveaux extremums de run-up dépassent le niveau de crête, l'ouvrage va être franchi.

Le franchissement sert souvent à déterminer le niveau de crête et la géométrie de la section en garantissant que le débit franchissant moyen spécifique, q(m^3/s par mètre linéaire de crête), reste inférieur à des limites acceptables dans les conditions de dimensionnement **(figure 2)**

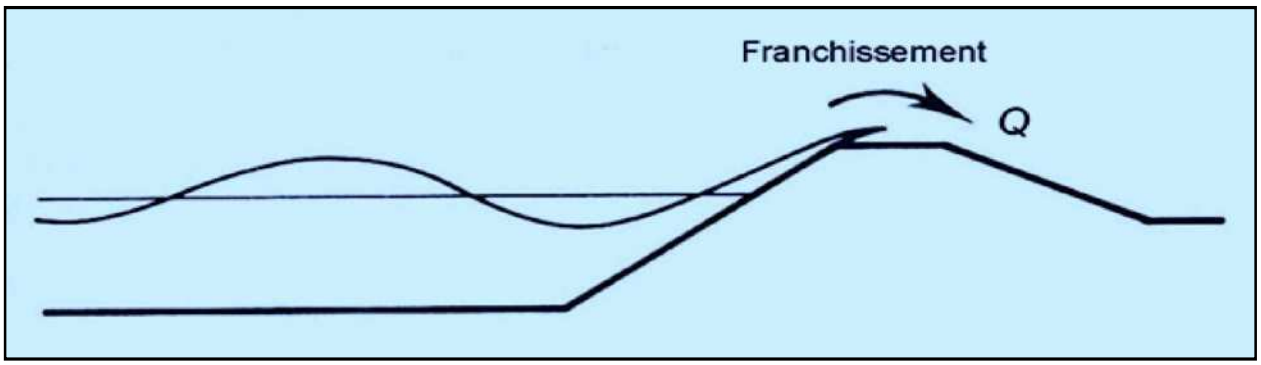

Figure 2: Schéma d'illustration d'un franchissement (**CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

I.2.3 Transmission de la houle

C'est le prolongement du franchissement et le passage des vagues sur la structure **(figure 3)**.

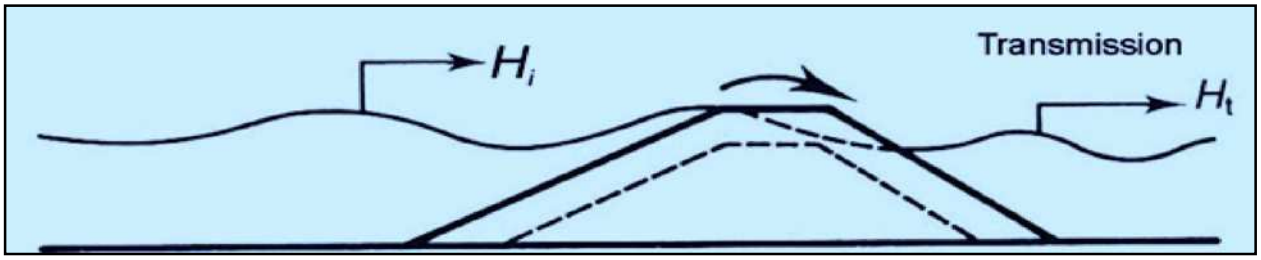

Figure 3 : Schéma d'illustration d'un transmission (**CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

I.2.4 Réflexion de la houle

Selon **Zaki** et ***al*,(2004)** la rencontre de deux ondes sinusoïdales de même amplitude se propageant en sens inverse conduit, selon le principe de superposition, à une onde résultante ayant une amplitude double, et à la formation de nœuds stationnaires. Ceci est valable dans le cas d'une houle monochromatique et diffère peu de ce qu'on obtiendrait quand la houle entre en choc contre un mur vertical par exemple

La réflexion se produit aussi quand la houle rencontre un obstacle incliné, mais l'étude mathématique du phénomène sera compliquée par le déferlement.

I.2.5 Le déferlement de la houle

Le déferlement se produit quand les lames atteignent une certaine cambrure limite, au delà de laquelle le profil devient instable **(Galvin, 1968 *in* Bougis, 1996).**

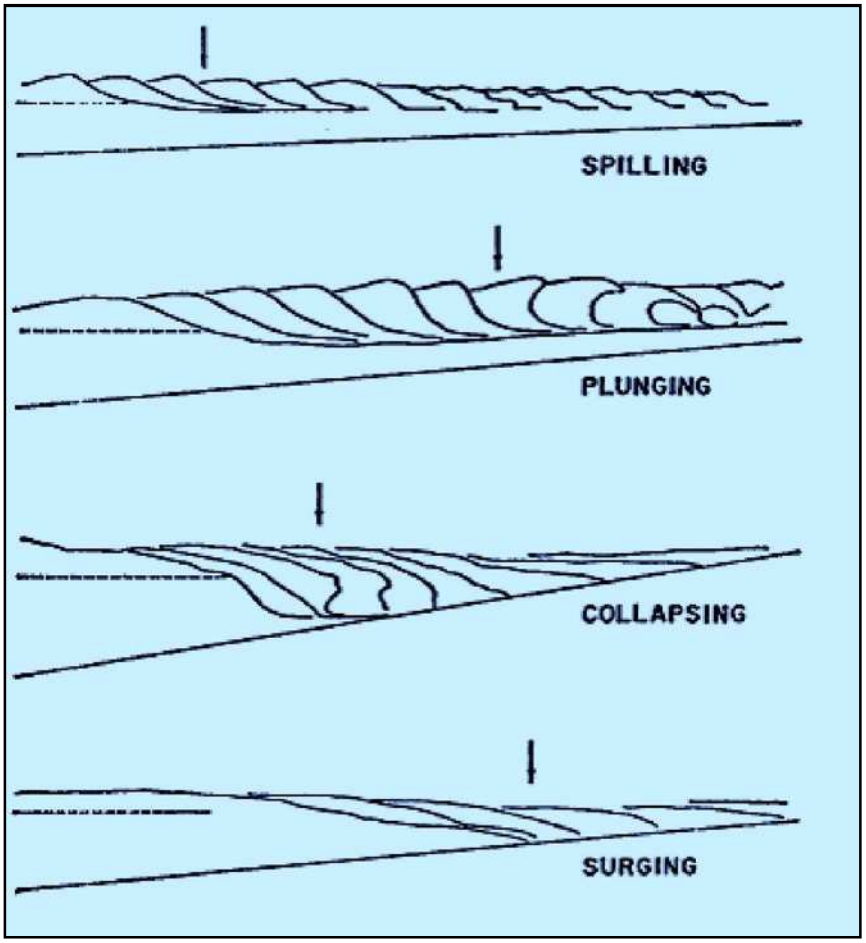

Figure 4: Profils longitudinaux des quatre types de déferlement.

Les flèches indiquent le point initial du déferlement **(Galvin, 1968 *in* Bougis, 1996).**

On distingue :

I.2.5.1. Le déferlement en "volute" ou "plongeant"

Où le profil se déforme rapidement et se dresse avant que sa partie supérieure ne plonge et se brise brutalement **(figure 5).**

Figure 5: Déferlement plongeant**. (Bougis, 1996).**

I.2.5.2. Le déferlement frontal ou gonflement

La partie frontale du profil se gonfle et prend un aspect moutonné. Les déferlements à gonflement forment de faibles vagues stationnaires qui arrivent sur la plage avec des turbulences générées par le frottement sur les fonds. La **figure 6** montre un cas typique de déferlement frontal **(Bougis, 1996).**

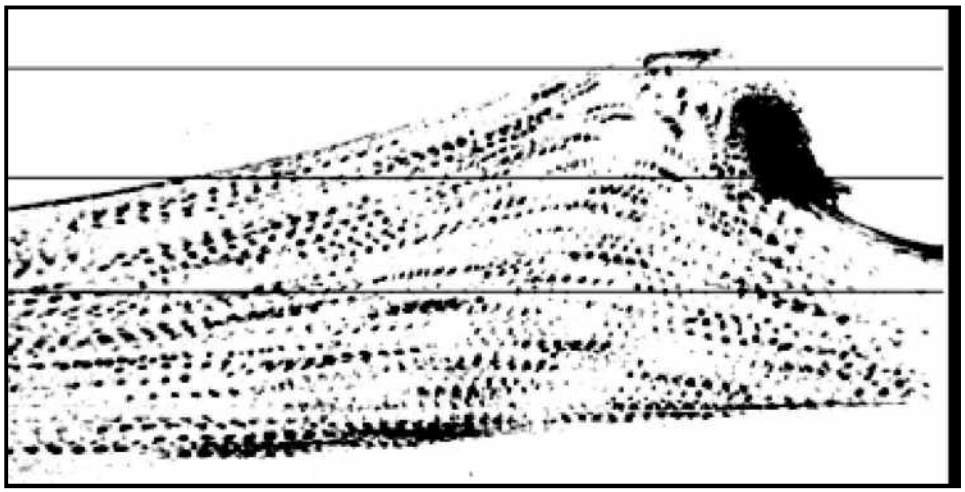

Figure 6: Déferlement frontal **(Bougis, 1996).**

I.2.5.3. Le déferlement glissant

La symétrie du profil est conservée et il y a formation d'écume à la partie supérieure **(Zaki et *al*, 2004) (figure 7)**.

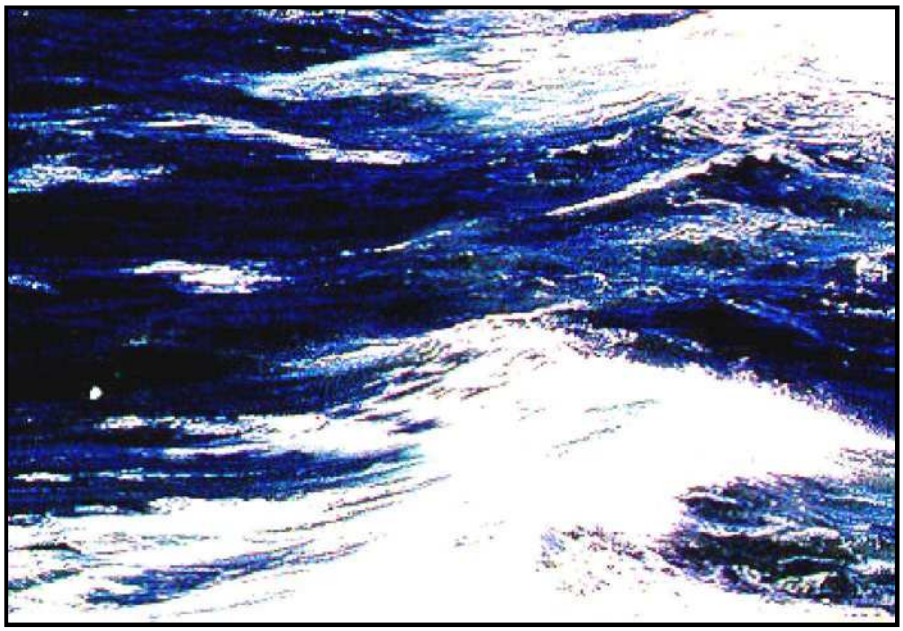

Figure 7: Déferlement glissant**. (Bougis, 1996).**

I.2.5.4.Le déferlement à effondrement

Le déferlement "à effondrement" ("collapsing breaking") représente un type intermédiaire entre le déferlement plongeant et le déferlement frontal. La **figure 8** montre un cas typique de déferlement à effondrement **(Bougis, 1996).**

Figure 8: Déferlement à effondrement **(Bougis, 1996).**

Chapitre II

Run-up et Run-down

II. Run-up et Run-down

II.1. Run-up de la houle

L'estimation de run-up, R_u , peut déterminé a partir des équations empiriques simples à l'aide des essais effectués sur des modèles physiques, ou sur des modèles numériques d'interaction houle et ouvrage. Chaque méthode nécessite une bonne définition et précision des paramètres des calcules.

Le run-up et le run-down sont souvent donnés sous forme adimensionnelle en divisant leur valeur par la hauteur significative de la houle à l'ouvrage, par exemple $R_{u\%} / H_s$ et $R_{d\%} / H_s$

L'étude de hauteur de run-up (R_u) s'effectue à partir du paramètre adimensionnel R_u/H qui est fonction du nombre d'**Iribaren-Battjes**. Les études menées par **Miche (1951)** ont permis d'établir une expression théorique du run-up sur un talus de pente régulière :

$$\frac{R_u}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} \qquad (1)$$

Pour les houles non linéaires, **Le Méhauté, et *al* (1968)** ont obtenu une expression théorique plus complexe à utiliser :

$$\frac{R_u}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} + \pi\frac{H_0}{\lambda_0} - \Delta \qquad (2)$$

Expression dans laquelle Δ représente la dissipation d'énergie engendrée par le déferlement et le frottement sur le fond**. I.A. Hunt (1959)** a proposé la relation empirique :

$$\frac{R_u}{H_0} = \xi_0 \qquad (3)$$

Différents travaux expérimentaux, réalisés en particulier au **LNH** (EDF), ont permis d'établir, pour les houles régulières, la loi empirique suivante :

$$\frac{R_u}{H_0} = 0.67\xi_0^{0.51} \qquad (4)$$

D'après les travaux réalisés par **Ahrens (1981)** et préconisée par le CERC et par EDF, dans le cas d'une houle irrégulière, le risque de franchissement frontal d'un talus peut être évalué à partir de l'expression :

$$\frac{R_u(p)}{H_s} = 0.67\left(\frac{\mathrm{tg}\alpha}{\sqrt{2\pi H_s / g\, T_p^2}}\right)^{0.51}\sqrt{-\frac{\ln p}{2}} \qquad (5)$$

Dans laquelle les différents symboles désignent respectivement :

- p=Prob [R_U>R_U(p)] : la probabilité que Ru soit supérieur à R_u(p),
- R_U (m) : la hauteur au dessus de la surface libre atteinte par l'eau,
- H_s (m) : la hauteur significative de la houle,
- tgα : la pente de la digue,
- Ts (s) : la période significative de la houle.
- Tp≈ 1.05 Ts (s) : la période de pic du spectre de la houle d'après Goda.

Soit en introduisant la période significative de la houle :

$$\frac{R_u(p)}{H_s} = 0.67\left(\frac{\mathrm{tg}\alpha}{\sqrt{H_s / 1.72\, T_s^2}}\right)^{0.51}\sqrt{-\frac{\ln p}{2}} \qquad (6)$$

La plupart des concepts actuels de run-up consistent en une formule de base qui est une fonction linéaire plutôt simple du paramètre de déferlement, ξ (-).

L'**Équation 7** exprime la relation générale qui existe entre le run-up dépassé par 2 %des vagues, $R_{u2\%}$(m), la pente du talus, la hauteur et la période de la houle (à travers ξ).

$$R_{u2\%} / H_s = A\,\xi + B \qquad (7)$$

Où A et B sont des coefficients d'ajustement (-) définis ci-dessous.

II.2. Approche fondamentale du run-up

Les méthodes réservées aux talus lisses pourront cependant être utilisées pour les talus en enrochements intégralement liés au béton ou au bitume.

Dans certains cas, les méthodes d'estimation élaborées pour les talus lisses peuvent servir pour les talus rugueux, en appliquant un facteur de correction de rugosité. Des facteurs de correction peuvent également être utilisés pour prendre en compte des éléments qui rendent la situation plus complexe, tels qu'une houle oblique, une eau peu profonde et des talus à berme. Toutefois, à la place des facteurs de correction, quelques formules explicites ont été mises au point pour les talus rugueux et perméables et pour des conditions particulières telles que les vagues induites parla navigation **(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers).**

II.2.1. Talus lisses

Sur la base de mesures, **Ahrens (1981)** a élaboré une courbe d'estimation correspondant à l'**Équation 7** pour le run-up dépassé par 2 % des vagues, en utilisant ξ_p, avec les coefficients A = 1,6 et B = 0 pour $\xi_p < 2,5$. Pour des valeurs du paramètre de déferlement plus importantes (c'est-à-dire $\xi_p > 2,5$), les coefficients A et B de la courbe deviennent alors A = - 0,2 et B = 4,5.

Allsop et *al* (1985) ont également mis au point une courbe d'estimation correspondant à l'**Équation 7**pour des valeurs du paramètre de déferlement, ξ_p, comprises entre 2,8 et 6. Pour estimer le run-up dépassé par 2 % des vagues, les coefficients suivants sont suggérés (marges de sécurité exclues) : A = - 0,21 et B = 3,39.

Pour les courbes de prédiction d'**Ahrens (1981)** et d'**Allsop et *al.* (1985)**, des facteurs de correction peuvent être utilisés pour prendre en compte l'influence des bermes, γ_b, de la rugosité du talus, γ_f, de l'obliquité de la houle, γ_β, et de l'eau peu profonde, γ_h, (**Équation 8).** Pour des talus lisses et de pente constante avec une houle perpendiculaire et en eau profonde, ces facteurs sont tous égaux à 1.

$$R_{u2\%} / H_s = \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_h \left(A \, \xi_p + B \right) \qquad (8)$$

Une courbe d'estimation élaborée aux Pays-Bas et présentée dans un rapport du **TAW** intitulé Technical Report on Wave Run-up and Overtopping at Dikes (Rapport technique sur le run-up et le franchissement de la houle sur les digues).**(TAW, 2002**), utilise le paramètre de déferlement

$\xi_{m-1,0}$, déterminé d'après la hauteur significative spectrale de la houle ($H_s = H_{m0}$) et de la période moyenne énergétique de la houle, $T_{m-1,0}$, au lieu de la hauteur significative de la houle calculée par analyse dans le domaine temporel ($H_s = H_{1/3}$) et de la période de pic, T_p, comme le faisaient les méthodes d'**Ahrens (1981)** et d'**Allsop et *al.* (1985)**. La période moyenne énergétique de la houle, $T_{m-1,0,}$ rend compte de l'influence de la forme du spectre et de l'eau peu profonde **(Van Gent, 2001** et **2002).**

Le **TAW (2002)** propose les **Équations 9** et**10** pour la détermination du run-up de la houle :

$$R_{u2\%} / H_{m0} = A\, \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta\, \xi_{m-1,0} \qquad (9)$$

Avec une limite maximale ou supérieure pour les valeurs de $\xi_{m-1,0}$ les plus élevées **(figure 9)** de :

$$R_{u2\%} / H_{m0} = \gamma_f\, \gamma_\beta \left(B - C / \sqrt{\xi_{m-1,0}} \right) \qquad (10)$$

Cette courbe d'estimation, représentée à la **(figure 9)** est valable pour $0.5 < \gamma_b\ \xi_{m-1,0} < 8$ à 10.

Le coefficient de réduction en présence d'une berme, γ_b, le coefficient de réduction en cas de talus rugueux, γ_f, et le coefficient de réduction en présence de houle oblique, γ_β. Dans le cas d'un talus de pente constante et lisse en houle perpendiculaire, ces facteurs sont tous égaux à 1. Des valeurs ont été calculées pour les coefficients **A**, **B** et **C** des **Équations 9** et **10**, qui représentent la tendance moyenne, μ, dans la totalité des données utilisées dans les calculs probabilistes. Pour les calculs déterministes, il est suggéré d'utiliser des valeurs qui intègrent une marge de sécurité d'un écart type, σ.

Le **Tableau.1**présente les deux valeurs pour chacun des trois coefficients **A**, **B** et **C. (CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

Tableau 1: Valeurs des coefficients **A**, **B** et C des **Équations 9** et**10**

Coefficients (des Eq. 9 et 10)	**Valeurs avec marge de sécurité (μ-σ) - calculs déterministes**	**Valeurs sans marge de sécurité -Tendance moyenne/calculs probabilistes**
A	1,75	1,65
B	4,3	4,0
C	1,6	1,5

II.2.2. Talus rugueux

Pour calculer le run-up de la houle sur les talus rugueux, il est possible d'utiliser soit des facteurs de correction de la rugosité soit des formules explicitement calculées. A titre de première estimation, il est possible d'utiliser l'approximation suivante : $R_{u2\%}/H_s < 2,3$.

II.2.2.1. Talus rugueux - facteurs de correction

Le calcul du run-up sur des talus rugueux imperméables peut être basé sur les méthodes réservées aux talus lisses énoncées ci-dessus en appliquant un facteur de réduction, γ_f, qui vient multiplier le run-up obtenu sur un talus lisse. Étant donné qu'il existe des différences entre les méthodes consacrées aux talus lisses, les limites d'utilisation de ce facteur diffèrent pour les méthodes d'estimation d'**Ahrens (1981)** et d'**Allsop** et ***al.* (1985)**, par rapport à la méthode du **TAW (2002)**. À ce propos, se reporter à la note en dessous du **Tableau 2**. Les coefficients de rugosité qui figurent au **Tableau 2** sont extraits du Technical Report on Wave Run-up and Overtopping at Dikes du **TAW (2002).**

Tableau 2: Valeurs du coefficient de réduction de rugosité, γ_f **(TAW, 2002)**

Type d'ouvrage	γ_f
Béton, bitume et herbe	1,O
Enrochements appareillés	O,8O – 0,95
Enrochement naturel - couche unique sur une base imperméable	0,70
Enrochement naturel - deux couches sur une base imperméable	0,55
Enrochement naturel - base perméable	Figure 3

II.2.2.2. Talus rugueux - formules explicites

Plutôt que d'utiliser les facteurs de correction de rugosité, des formules explicites ont été établies à partir d'essais sur des talus rugueux en enrochement avec des noyaux perméables et imperméables **(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers).**

Pour la plupart des conditions de houle et des pentes d'ouvrages, un talus en enrochement dissipe bien plus d'énergie de la houle qu'un talus équivalent lisse ou imperméable. En règle générale, le run-up est donc réduit. Cette réduction dépend de la perméabilité de la carapace, du filtre et des sous-couches, ainsi que de la cambrure de la houle, s(-). Pour obtenir une variante à l'utilisation

d'un facteur de correction de rugosité, le run-up a été mesuré sur des talus recouverts d'enrochement naturel lors d'essais en laboratoire, en houle régulière ou aléatoire. Dans de nombreux cas, on a opté pour un noyau relativement perméable. Les essais présentent donc souvent une vaste gamme de résultats au sein de laquelle le concepteur doit interpoler **(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers).**

L'analyse des résultats des essais effectués par **Van der Meer et *al* (1992)** a permis de déterminer des formules d'estimation (**Équations 11** et **12**) pour des talus à carapace en enrochement naturel avec un noyau imperméable, caractérisé par un coefficient de perméabilité nominale P = 0.1 et pour des talus perméables d'une perméabilité relativement élevée, pour lesquelles P = 0.5 et 0.6.

Il faut noter que cette analyse repose sur ξ_m.

$$R_{un\%} / H_s = a\,\xi_m \qquad \text{pour } \xi_m \leq 1.5 \tag{11}$$

$$R_{un\%} / H_s = b\,\xi_m^{\,c} \qquad \text{pour } \xi_m > 1.5 \tag{12}$$

Les courbes de prédiction basées sur les **Équations 11** et **12** donnent la tendance moyenne des données et illustrent les conditions avec noyau perméable et avec noyau imperméable.
Le run-up pour des ouvrages perméables (P > 0,4) est limité à un maximum, donné par l'**Équation 13**:

$$R_{un\%} / H_s = d \tag{13}$$

Les valeurs des coefficients **a**, **b**, **c** et **d** des **Équations 11** à **13** ont été déterminées pour différents niveaux de dépassement du run-up. Elles sont présentées au **Tableau 3**. La dispersion expérimentale de **d** est de l'ordre de 0,07.

Tableau 3: Coefficients des **Équations 11** à **13**

Run-up dépassé par n % des vagues	A	B	c	D
0,1	1,12	1,34	0,55	2,58
1	1,01	1,24	0,48	2,15
2	0,96	1,17	0,46	1,97
5	0,86	1,05	0,44	1,68
10	0,77	0,94	0,42	1,45
50(valeur médiane)	0,47	0,60	0,34	0,82

Les **Équations 11** et **12** utilisent la période moyenne de la houle, T_m, alors que pour les talus lisses, il s'agissait de la période moyenne énergétique de la houle, $T_{m-1,0}$ (**Équations 9**et **10**).

Les recherches du programme CLASH de l'UE ont démontré que pour de petites valeurs du paramètre de déferlement, il y aurait une différence entre les valeurs de $R_{u,2\%}$ dans le cas de sous couches perméables et dans le cas de sous-couches imperméables. C'est pour cette raison que les données initiales de **Van der Meer et *al* , (1992)** ont été réanalysées, ce qui a conduit aux courbes d'estimation présentées à la(**figure 9)**.

La **Figure 9** présente les résultats pour trois talus avec noyau imperméable et trois talus avec noyau perméable ; chacun de ces noyaux est représenté par une courbe de prédiction. Par ailleurs, une troisième courbe d'estimation a été ajoutée pour les talus lisses. La courbe correspondant à un noyau imperméable est basée sur $\gamma_f = 0,55$ et la courbe correspondant à un noyau perméable sur $\gamma_f = 0,4$. À partir de $\xi_{m-1,0} = 1,8$, le coefficient de correction de rugosité augmente de manière linéaire jusqu'à 1 pour $\xi_{m-1,0} = 10$, puis il reste égal à 1 pour des valeurs supérieures. Toutefois, dans le cas d'un noyau perméable, un maximum de $R_{u2\%} / H_s = 1,97$ (**Tableau 1**) est atteint.

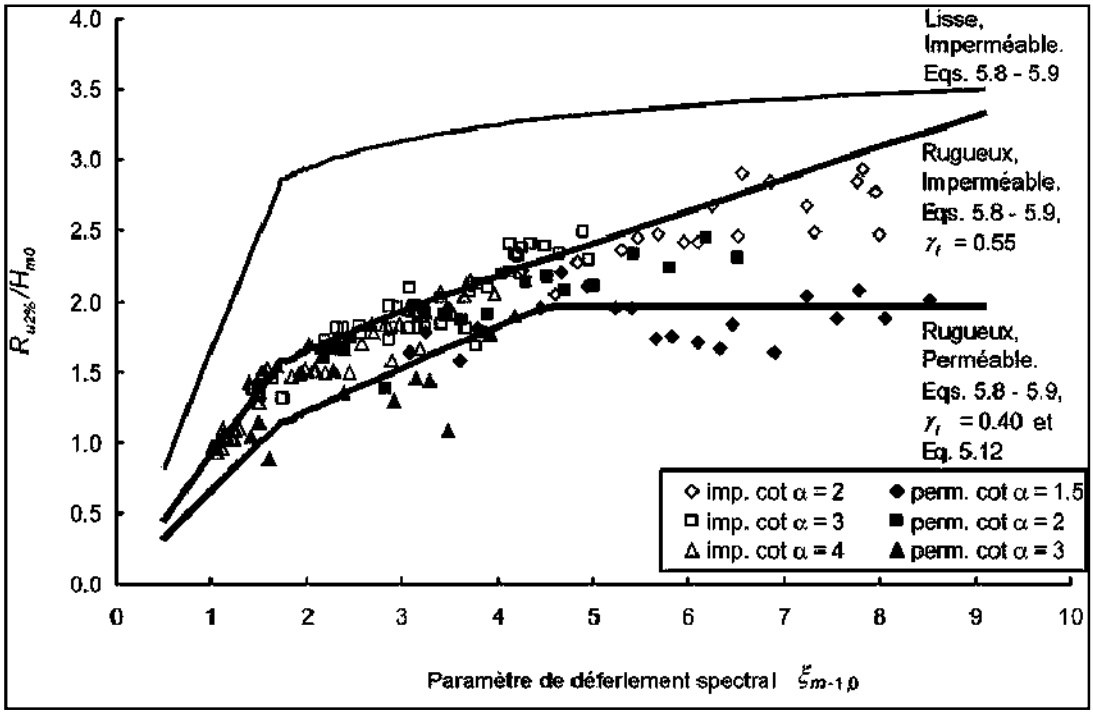

Figure 9: Run-up relatif sur des talus en enrochement en fonction de la perméabilité du noyau, déterminé à l'aide du paramètre de déferlement calculé à partir des valeurs spectrales de la houle, $\xi_{m-1,0}$, et des **Équations 9**, **10** et **13**.**(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

II.2.3. Conditions particulières

Les effets de la houle oblique (au moyen du facteur de correction, γ_β), de l'eau peu profonde (au moyen du coefficient de réduction, γ_h), des talus à berme (au moyen du facteur de correction γ_b) et des vagues induites par la navigation sur le run-up de la houle sont présentés dans ce qui suit.

II.2.3.1. Houle oblique

En cas de houle oblique, l'angle d'incidence de la houle, β (°), est défini comme l'angle formé par la direction de propagation de la houle et l'axe perpendiculaire à l'ouvrage (pour une attaque normale, β = 0°).

La plupart des recherches effectuées sur l'influence de l'incidence de la houle concerne des cas de houle longue qui n'a pas de distribution directionnelle. Toutefois, dans la nature, la houle est courte (seule la houle océanique peut être considérée comme longue), ce qui signifie que les

crêtes des vagues ont une longueur finie et que la houle a une direction d'incidence moyenne. Cette dispersion directionnelle de la houle courte affecte le run-up et les franchissements.

Les conclusions concernant la prise en compte de la houle oblique dans le calcul du run-up applicables à toutes les méthodes présentées sont les suivantes :

• le run-up et le franchissement de la houle courte est maximal pour une incidence normale de la houle.

• le coefficient de réduction du run-up pour des angles d'incidence importants de la houle courte n'est pas inférieur à 0,8, par rapport à un angle d'incidence nul.

L'**Équation 14** donne le facteur de correction γ_β pour les différentes méthodes de calcul du run-up d'une houle courte oblique :

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0022\,|\beta| \qquad \text{pour } 0° \le |\beta| \le 80° \tag{14}$$

Pour les angles d'incidence $\beta > 80°$, le calcul est effectué avec $\beta = 80°$.

II.2.3.2. Eau peu profonde

En eau peu profonde, généralement définie par $h/H_{s\text{-en pied}} < 3$, où h est la profondeur d'eau au pied de l'ouvrage (m), la distribution des hauteurs de la houle et le spectre énergétique de la houle changent. La distribution des hauteurs de la houle, par exemple, s'écarte de la distribution de **Rayleigh**. Il en résulte que $H_{2\%}/ H_s$ peut être inférieur à 1,4 (**Rayleigh**), avec des valeurs habituellement comprises entre 1,1 et 1,4. Dans l'**Équation 8,** l'influence du changement de distribution de la hauteur des vagues sur le run-up peut être exprimée par un coefficient de réduction de profondeur, γ_h (-), calculé à partir de $H_{2\%}$ et H_s au pied de l'ouvrage selon l'**Équation 15**.

$$\gamma_h = \left(H_{2\%} / H_s\right)/1.4 \tag{15}$$

La valeur du coefficient de réduction de profondeur est : $\gamma_h = 1$ en eau profonde, c'est-à-dire pour $h/H_{s\text{-en pied}} \ge 4$. La méthode de **Battjes** et ***al*** **(2000)** donne une approche générique permettant d'obtenir des estimations du ratio $H_{2\%}/ H_s$.

Les **Équations 9** et **10** présentées par le **TAW (2002)** sont basées sur des essais incluant des essais en eau peu profonde. Cette méthode d'estimation est donc également applicable dans ce domaine sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à un coefficient de réduction. Les effets de la profondeur d'eau sur le run-up sont abordés par **Van Gent (2001)**, par exemple.

II.2.3.3. Talus à berme

Le **TAW (2002)** propose une méthode pour prendre en compte l'influence des talus à berme sur le run-up et sur le franchissement de la houle. Cette méthode est divisée en deux étapes :

1. Calcul de l'angle de talus représentatif, α(°), afin de déterminer le paramètre de déferlement, ξ.
2. Calcul du facteur de correction en présence d'une berme, γ_b. (le facteur de correction, γ_b, est valide pour les méthodes d'**Arhens (1981), Allsop** et ***al*, (1985)** et également pour la méthode du **TAW (2002)**.

La **figure 10** et l'**Équation 16** montrent comment obtenir l'angle de talus représentatif, α, qui est utilisé dans le calcul du paramètre de déferlement, nécessaire pour déterminer le run-up de la houle.

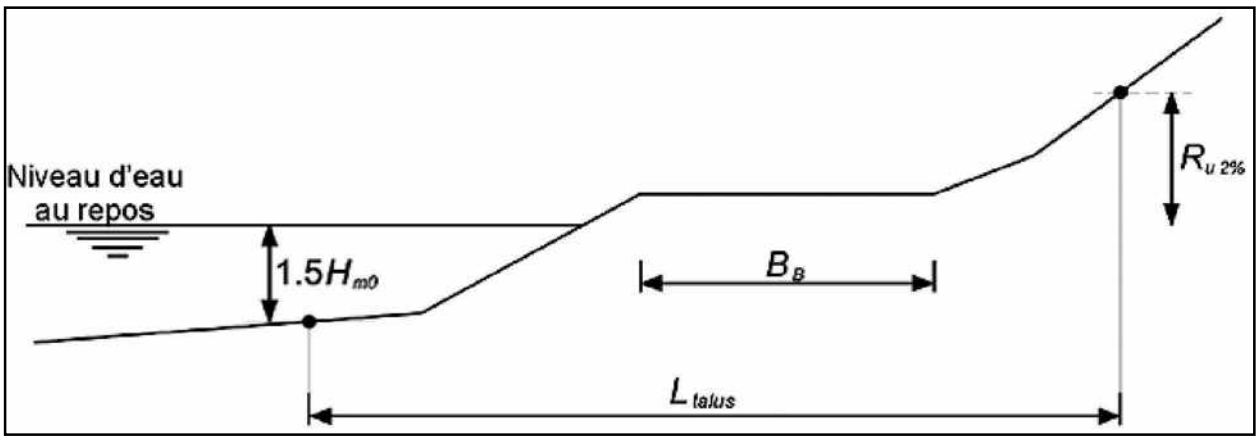

Figure 10: Définition d'un angle de talus représentatif, désigné par tan α **(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

$$\tan\alpha = \left(1.5\,H_{m0} + R_{u\,2\%}\right) / \left(L_{talus} - B_B\right) \qquad (16)$$

Après avoir obtenu le paramètre de déferlement, ξ, à utiliser dans la méthode d'estimation, un facteur de correction en présence d'une berme, γ_b, est proposé par le **TAW (2002)**. Ce facteur de correction (l'**Équation 17**) est composé de deux coefficients, l'un pour l'influence de la largeur de la berme, k_B, et l'autre pour la position du milieu de la berme par rapport au niveau de l'eau au repos, k_h :

$$\gamma_b = 1 - k_B\left(1 - k_h\right) \qquad \text{avec } 0.6 \le \gamma_b \le 1.0 \qquad (17)$$

Cette méthode est valable pour les bermes dont la largeur reste inférieure au quart de la longueur d'onde de la houle au large, L_o (m), calculée dans cette méthode avec $T_{m-1,0}$. Elle n'est également valable que pour le calcul de l'influence des bermes dont la pente reste inférieure à 15/1, et les bermes inclinées dans cet ordre de grandeur doivent être définies comme équivalentes à une berme horizontale ($B_{après} = B_B$ dans l'**Équation 18**), tel que présenté à la (**figure 10)**. Si la pente de la berme est supérieure à 15/1, il est suggéré de calculer le run-up et le franchissement de la houle par interpolation entre la berme la plus raide (15/1) et un talus régulier (8/1), ou par interpolation entre les résultats pour une berme la plus longue possible ($L_o/4$) et les résultats prenant en compte une eau peu profonde.

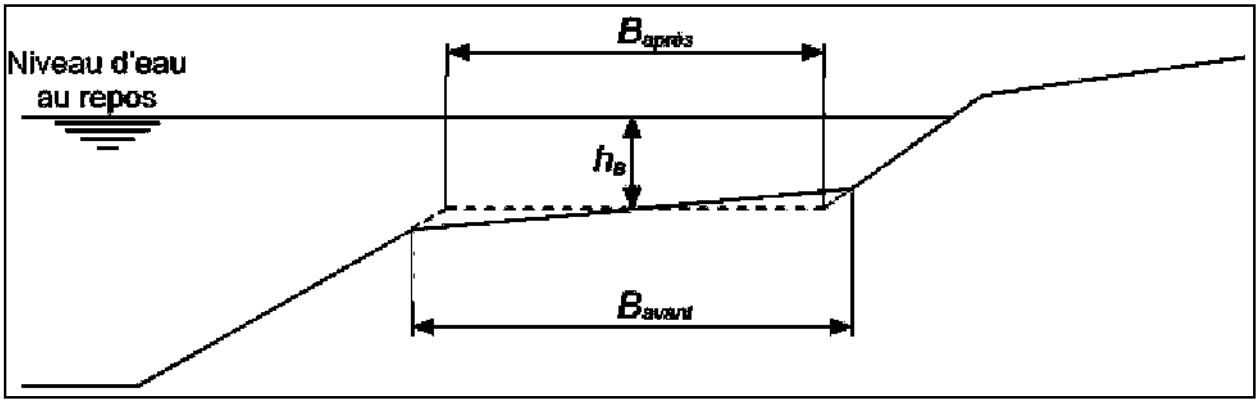

Figure 11: Définition de la largeur de berme, B, utilisée dans l'**Équation 18**, et de la hauteur d'eau au dessus de la berme, h_B **(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

Le facteur d'influence de la largeur de berme, k_B, est calculé à l'aide de l'**Équation18** la longueur de berme, L_{berme} (m), est montrée à la **(figure 12)** :

$$k_B = 1 - \frac{2\,H_{m0} / L_{berme}}{2\,H_{m0} / (L_{berme} - B_B)} = \frac{B_B}{L_{berme}} \qquad (18)$$

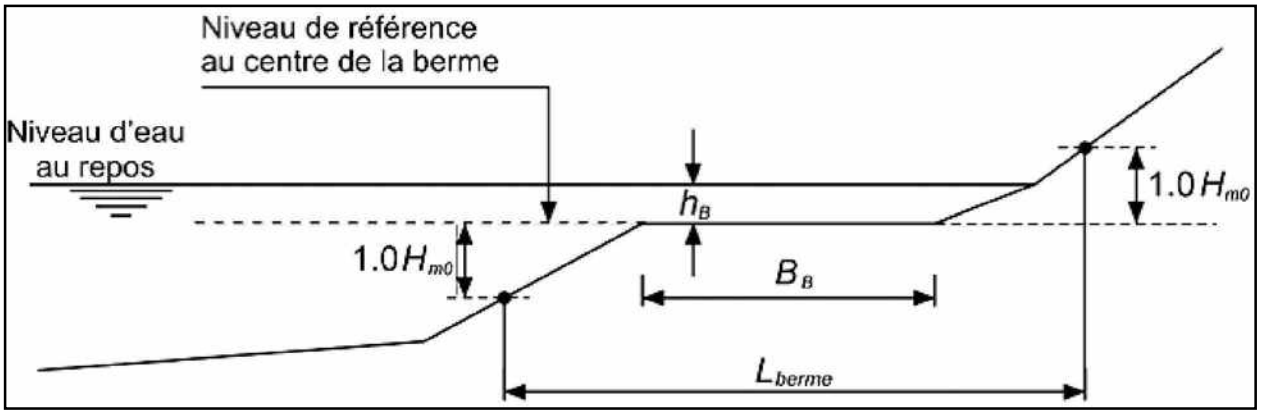

Figure 12: Talus à berme**(CERC 2003, 2006. Us Army Corps of Engineers)**

Avec l'approche du **TAW (2002)**, une berme positionnée au niveau de l'eau au repos est particulièrement efficace. L'influence de la berme disparaît lorsqu'elle est située au-dessus du run-up, $R_{u2\%}$, ou lorsqu'elle se trouve à plus de $2H_{m0}$ en dessous du niveau de l'eau au repos.

L'influence de la position de la berme peut être déterminée au moyen d'une fonction cosinus, dans laquelle le cosinus est donné en radians, par l'**Équation 19** :

$$k_h = 0.5 - 0.5\cos\left(\pi\frac{h_B}{x}\right) \tag{19}$$

Où

x = $R_{u2\%}$ si la berme est au-dessus du niveau de l'eau au repos, soit $0 < h_B < R_{u2\%}$.

x = $2H_{m0}$ si la berme est en dessous du niveau de l'eau au repos, soit $0 \leq h_B < 2H_{m0}$.

k_h = 1 si la berme est en dehors de la zone d'influence, soit $h_B \leq -R_{u2\%}$ ou $h_B \geq 2H_{m0}$.

II.2.3.4. Vagues induites par la navigation

L'ensemble des relations empiriques suivantes a été élaboré pour le run-up des vagues induites par la navigation. Les formules ont été calibrées pour des navires traditionnels circulant sur les voies navigables intérieures néerlandaises et doivent être considérées comme spécifiques à ce cas particulier **(AIPCN, 1987)**. Des paramètres pour les vagues induites par la navigation similaires à ceux de la houle soulevée par le vent ont été utilisés. Le run-up des vagues induites par la navigation, Ru′, est exprimé en fonction d'un paramètre de déferlement, ξ, par les **Équations 20** à **22** :

$$R_u'/H = \xi \qquad \text{pour } \xi \leq 2.6 \tag{20}$$

$$R_u'/H = 6.5 - 1.5\,\xi \qquad \text{pour } 2.6 < \xi < 3.0 \tag{21}$$

$$R_u'/H = 2.0 \qquad \text{pour } \xi \geq 3.0 \tag{22}$$

Où $\xi = \tan \alpha / H_i / L_i$ et L_i est la longueur d'onde (m) égale à : $4/3\ \pi\ V_s^2/g$.

Le run-up est maximal pour les crêtes d'interférences ou les ondes secondaires induites par la navigation avec un angle d'incidence, β (°). Il peut être estimé à l'aide de l'**Équation 23**.

$$R_u'/H_i = 2.0\,\xi\sqrt{\cos\beta} \tag{23}$$

Cette **Équation 23** est valable pour les talus de pente constante et lisse. Ainsi, pour obtenir le run-up réel, il faut le multiplier par un coefficient de correction de rugosité, γ_f, et, le cas échéant, par un coefficient de réduction en présence d'une berme, γ_b. Les valeurs classiques du coefficient de correction de rugosité, γ_f, sont présentées au **Tableau 2**.

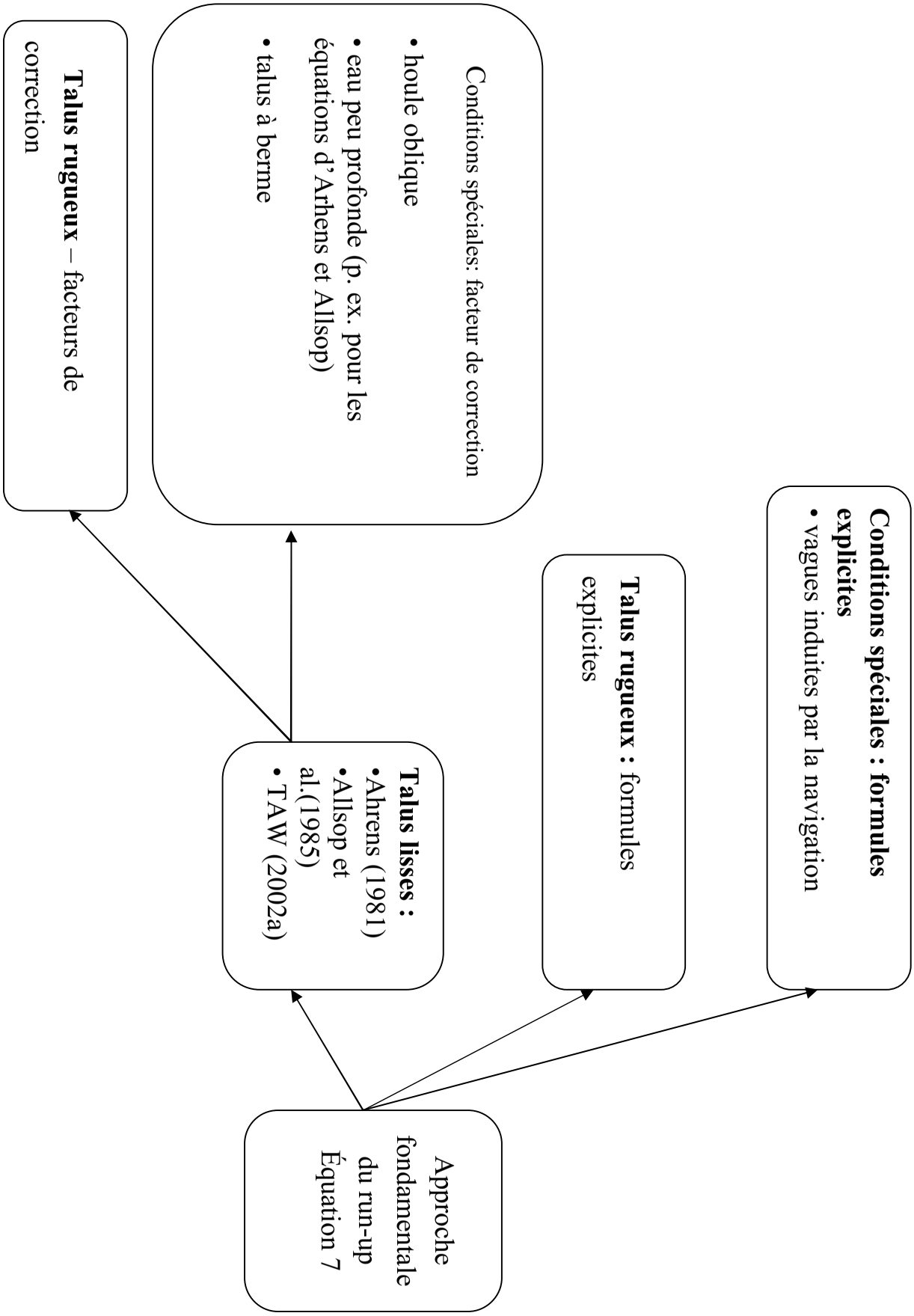

Figure 13 : Méthodes de calcul du run-up de la houle

Dans la plupart des cas, le problème est réduit à l'étude d'une onde simple sur un fond de profondeur constante interagissant avec une plage monodimensionnelle, ne comportant qu'une seule rupture de pente.les critères et loi de run-up disponibles sont fondés sur cette représentation

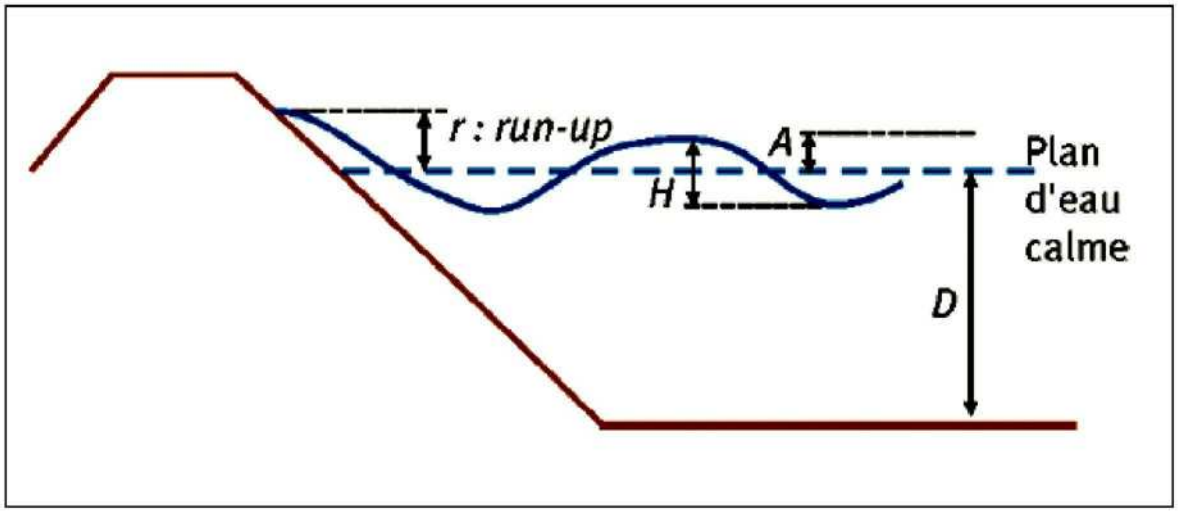

Figure 14:Run-up dans le cas d'une onde sinusoïdale **(Naaim et *al*, 2006).**

II. 3 . 1 Run-up d'onde solitaire

Run-up dans le cas des ondes solitaires

Pour les ondes solitaires, **Hall** et **Watts (1955**) ont mené une étude expérimentale très approfondie, qui fait encore référence aujourd'hui, et qui leur avait permis de construire une loi d'échelle empirique donnant le run-up normalisé par la profondeur d'eau en fonction de l'amplitude relative de l'onde incidente **(figure 15)** :

$$\frac{r}{D} = 3.1\left[\frac{A}{D}\right]^{1.15} \qquad (24)$$

Synolakis (1987) à établi une formule donnant le run-up normalisé par la profondeur d'eau (r/D) en fonction de l'amplitude relative de la vague, pour les vagues qui déferlent :

$$\frac{r}{D} = 1.11\left[\frac{A}{D}\right]^{0.58} \qquad (25)$$

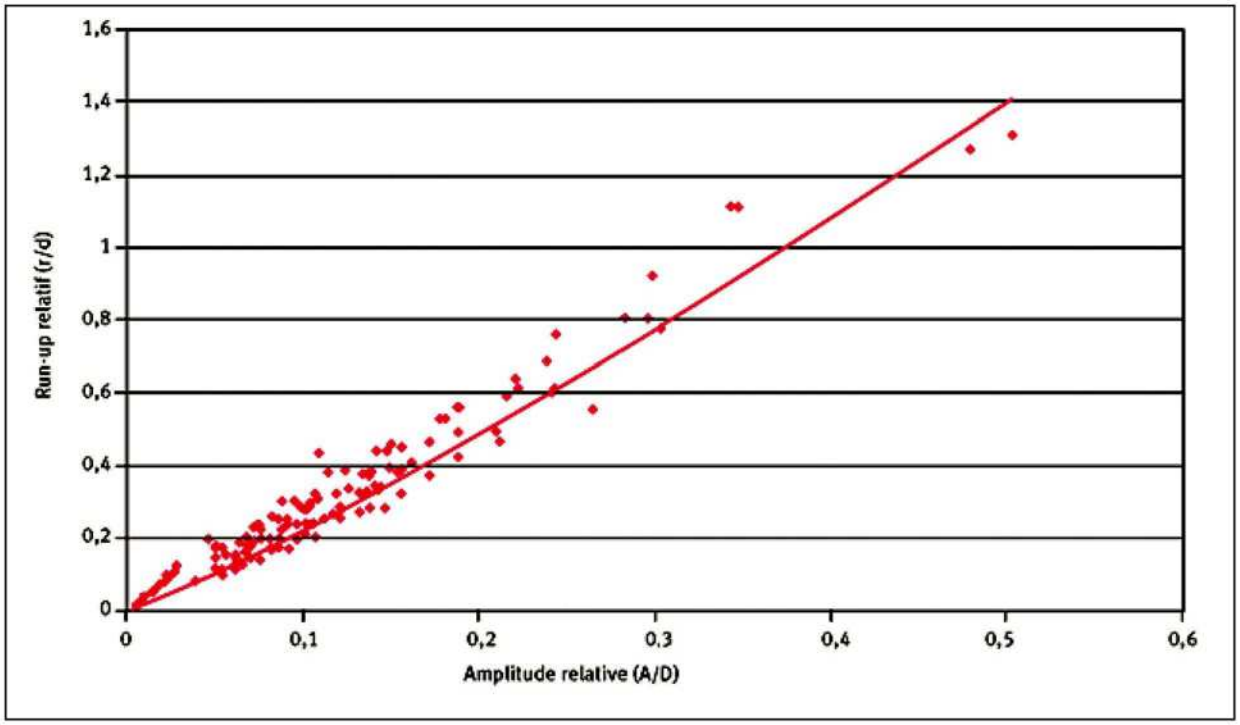

Figure 15: Run-up des ondes solitaires - données tirées de la littérature sans distinction entre les vagues qui déferlent et celles qui ne déferlent pas ; tracé de l'**Equation 24 (Naaim** et ***al*, 2006).**

Run-up d'ondes solitaires sur des pentes planes imperméables a été bien étudiée, la production de formules théoriques de longueur maximale et modèles numériques de l'ensemble de la période qui a précédé la séquence **(Synolakis, 1986; Li et Raichlen, 2001; Li et Raichlen, 2003)**.
run-up, et ils ont noté l'emplacement et l'orientation du flux d'ondes dynamique maximale pour les cas de premiers formes d'ondes positives et négatives**. (Naaim et *al*, 2006).**

II.3.1.Run-up dans le cas des ondes sinusoïdales :

Pour les vagues sinusoïdales produites par le vent, on distingue deux cas selon que la plage est lisse ou rugueuse.

Le premier cas est celui d'un parement amont lisse (par exemple géomembrane non recouverte). Le run-up relatif de la vague (r / H_d) est donné par le **Tableau 4** en fonction de la pente du talus et de H_d / L ; L est la longueur d'onde des vagues qui est donné par :

$$L = 1{,}56.T^2 \qquad (26)$$

Cette formule n'est valable que si D>L/2. T est la période du pic spectrale des vagues. Elle peut être estimée par la formule suivante due à **Smith (1991) :**

$$T = 0{,}0716.Ft^{0{,}28} / \hat{U}_a \qquad (27)$$

Tableau 4: Run-up relatif r/Hd pour un parement lisse. **(Hughes, 2004).**

Pente du talus amont ⟶	**1/3**	**1/2,5**	**½**
H_d/L =	1,15	1,4	1,9
H_d/L =	1,37	1,64	2,0
H_d/L =	1,49	1,73	2,0

Dans le cas d'une pente de 1/3, habituelle en cas de géomembrane, le **Tableau 5** donne les résultats suivants.

Tableau 5: Ru-up pour un parement amont lisse de pente 1/3

	U →	**120Km/h**		**150Km/h**		**180Km/h**	
↓D	**F_t →**	**100m**	**500m**	**100m**	**500m**	**100m**	**500m**
5m		0,53	1,13	0,71	1,48	0,92	1,85
10m		0,53	1,19	0,71	1,61	0,92	2,06
15m		0,53	1,19	0,71	1,63	0,92	2,06

II.3.3. Comparaison du run-up des ondes solitaires et sinusoïdales

Batjes (1974) a montré que le nombre sans dimension d'**Iribarren** est tout à fait pertinent pour rendre compte des transformations des ondes sinusoïdales près des plages et du run-up qui en résulte .Le run-up d'une onde sinusoïdale adimensionné par sa hauteur est donné par :

$$\frac{r}{H} = kI_r \qquad (28)$$

Le nombre d'**Iribarren** est donné par :

$$I_r = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \qquad (29)$$

Ou K une constante qui dépendent de la rugosité de la pente.

Ainsi, pour les ondes sinusoïdales, le run-up augmente avec la pente et diminue avec la raideur de la vague (H/L). Cette approximation n'est valable que pour des nombres d'**Iribarren** inférieur à 2,5. Au-delà, le rapport r/A tend vers environ 2,5 pour une surface lisse et 1 pour une surface rugueuse **(figure 16)**.

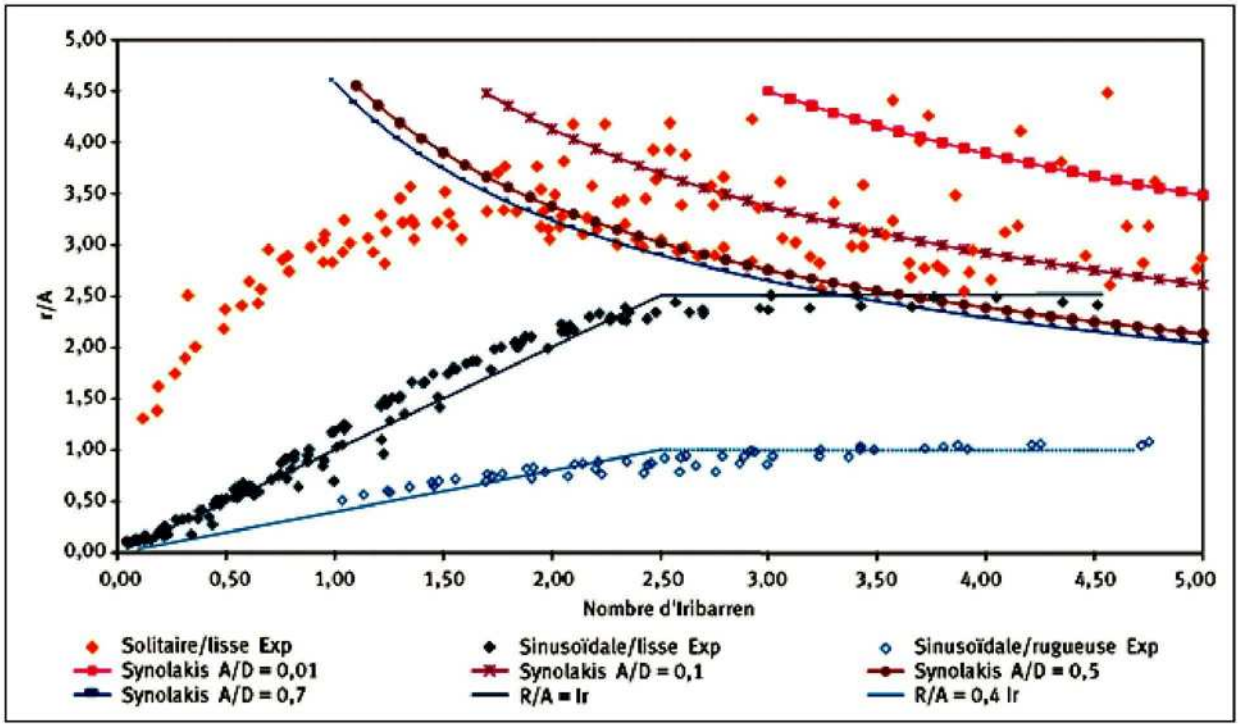

Figure 16: Comparaison du run-up des ondes solitaires et des ondes sinusoïdales **(Naaim et *al*, 2006).**

Pour comparer le run-up des ondes sinusoïdales à ceux des ondes solitaires, nous avons cherché à exprimer, pour les ondes solitaires, le run-up normalisé par l'amplitude de la vague en fonction du nombre d'**Iribarren** et de l'amplitude relative. Pour cela, nous avons dû choisir une longueur d'onde pertinente pour les ondes solitaire puisqu'en théorie leur longueur d'onde est infinie. En limitant l'extension de l'onde solitaire au domaine où la hauteur d'eau diminuée de la profondeur d'eau au repos est inférieure à 1 % de l'amplitude de la vague.

II.4. Run-down de la houle

Le niveau d'eau le plus bas atteint par la houle sur un talus est appelé run-down de la houle,R_d. Celui-ci est défini verticalement par rapport au niveau de l'eau au repos et sera positif s'il est inférieur au niveau de l'eau au repos, comme le montre la (**figure2)**.

Le run-down sur des talus lisses et de pente constante peut être calculé au moyen des **Équations 30** et **31**

$$R_{d2\%} / H_s = 0.33\ \xi_p \qquad \text{pour } 0 < \xi p < 4 \tag{30}$$

$$R_{d2\%} / H_s = 1.5 \qquad \text{pour } \xi p \geq 4 \tag{31}$$

Le run-down sur des talus perméables en enrochement est influencé par la perméabilité de l'ouvrage et par le paramètre de déferlement. Pour une carapace en enrochement à granulométrie étalée sur un talus imperméable, une expression simple (**Équation 32**) du run-down maximal, considéré comme étant celui dépassé par 1 % des vagues, a été établie à partir d'essais menés par **Thompson** et **Shuttler (1975)** :

$$R_{d1\%} / H_s = 0.34\ \xi_p - 0.17 \tag{32}$$

L'analyse du run-down par **Van der Meer (1988)** a donné une relation (**Équation 33**) qui inclut les effets de la perméabilité de l'ouvrage, P (-), de l'angle du talus, α (°), et de la cambrure nominale de la houle, s_{om} (-) :

$$R_{d2\%} / H_s = 2.1\sqrt{\tan\alpha} - 1.2\ P^{0.15} + 1.5 \exp\left(-60\, s_{om}\right) \tag{33}$$

Chapitre III

Tsunamis et leur simulation à l'aide du logiciel VOLNA

II. 1 Introduction

Les tsunamis sont des vagues de la mer de surface générées par gravité perturbations à grande échelle sous-marins. Mécanismes de déclenchement du tremblement de terre typiques sont initiés par les déplacements des fonds marins, les éruptions volcaniques, glissements de terrain (y compris les glissements de terrain sous-marins). **(Gedik et *al*, 2004).**

Quand l'énergie d'un tsunami est concentrée dans un secteur précis à cause de la configuration de la côte et/ou du plancher océanique, il est appelé wave trap (trappe à vague) par les Anglo-saxons. Si le tsunami est concentré dans un secteur resserré comme une baie longue et étroite ou l'embouchure d'un cours d'eau, il peut prendre la forme d'un mur appelé bore (trou). Dans ces cas, la force du tsunami est exceptionnelle : un des trois principaux tsunamis engendrés par l'explosion du Krakatoa en 1883 transporta un bloc de corail de 600 t à 100 m à l'intérieur des terres et un bateau à 2,5 km et à 24 m d'altitude. Ceux du Santorin ravagèrent la côte nord de la Crète. **(http://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/tsunamis_0.php)**

III.2. Cause de Tsunamis :

Ils peuvent être engendrés par divers phénomènes physiques :

– Les tremblements de terre : ils provoquent un déplacement vertical du sol marin qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres le long de la rupture ; l'eau située au dessus de ce sol marin est également déplacée de haut en bas, créant ainsi une vague plus ou moins longue.

– Les glissements de terres côtières, créant de grandes vagues lors de la chute de ces terres dans l'eau : ils peuvent être dus à de fortes pluies faisant s'écrouler la terre dans l'océan, ou à des tremblements de terre provoquant des détachements de terrain.

– Les glissements de terrain sous-marins : la terre située sur les zones hautes du relief sous-marin peut s'écrouler à la base de ce relief, créant ainsi une vague

– Les volcans (près de la côte, ou peu profonds) : les éruptions volcaniques peuvent non seulement générer des glissements de terrain sur les flancs du volcan, mais également des ondes de chocs créant un petit tsunami.

– Les météorites : elles peuvent aussi créer des tsunamis lors de l'impact dans l'eau, mais restent assez rares.

Les tsunamis peuvent être caractérisés grâce au run-up, la hauteur maximale de la vague lorsqu'elle atteint la plage. Plusieurs tsunamis se sont succédés durant les dernières années **Costas E, S** et **al** ; pendant certains de ces tsunamis, des habitants se pensaient protégés par des îles se situant devant la plage, mais ont au contraire observés un run-up plus élevé à cet endroit. Certaines études ont alors confirmé que lors de la présence de l'île de Vantla plage, le run-up derrière l'île était plus élevé que ce que l'on attendait **(Kanoglu et al).**

À cause de leur grande longueur d'onde, la crête du tsunami à la côte peut durer plusieurs minutes, ce qui augmente les risques.

Figure 17: Tsunamis au Japon

III.3. Run-up du Tsunamis

Le run-up d'un tsunami est fonction de plusieurs facteurs : profondeur, morphologie du plancher océanique, tracé de la côte. Dans certains cas, la côte peut réfracter le tsunami et l'orienter en direction de ports ou de baies habituellement protégées des vagues de tempêtes. Il est donc important d'établir des cartes de risques avec plusieurs scénarios fondés sur différentes orthogonales de vagues exceptionnelles **(http://www.notre-planete.info/medias/favicon.png).**

La vague du tsunami est modélisée par une "single wave**" (Per et *al*, 2010),** c'est-à-dire un seul déplacement de l'eau au dessus du niveau de la mer. La hauteur de la vague dépend de l'espace et du temps et peut être formellement modélisée par :

$$\eta(x_0,t) = A_0 sech^2(wt - 2.6) \text{ avec } A_0 = 1.5m \quad (34)$$

Où **w** est la fréquence de la vague.

On s'intéresse à l'influence de 5 paramètres physiques sur l'amplification du run-up :

Tableau 6 : Les paramètres physiques sur l'amplification du run-up

Notation	Paramètre	Domaine
Is	pente de l'île	0,05 – 0,2
Bs	pente de la plage	0,05 – 0,2
D	distance entre l'île et la plage	0 - 5000 m
H	profondeur de l'eau	100 - 1000 m
W	Fréquence de la vague	0,01 – 0,1 rad/s

Le schéma suivant représente la situation dans laquelle pour l'étude de l'amplification du run-up.

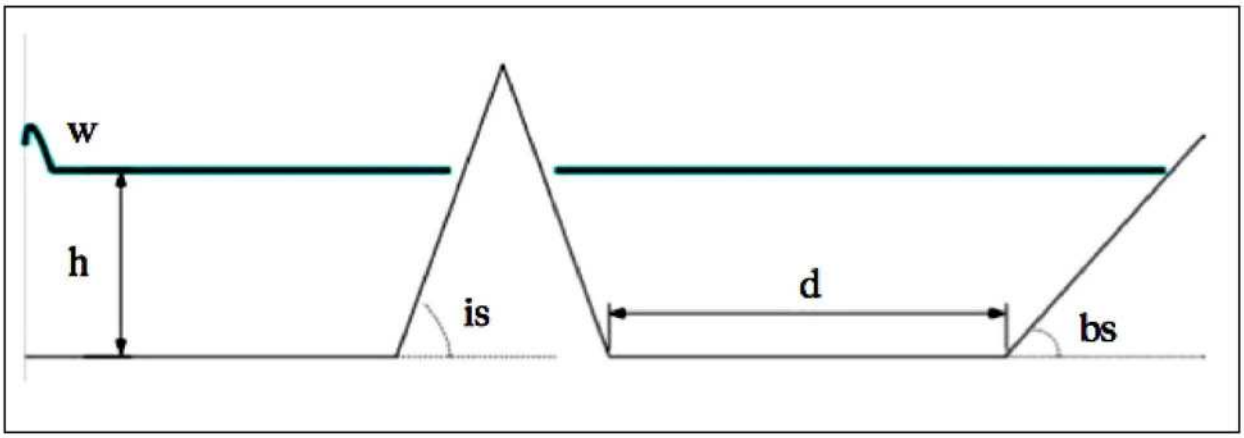

Figure 18: Schématisation des paramètres d'étude**.(Madsen et *al*, 2010).**

Afin d'étudier l'influence de ces 5 paramètres sur l'amplification du run-up, il est nécessaire d'effectuer, à l'aide du logiciel VOLNA **(Denys et *al* 2011)**, différentes simulations de tsunami. Il obtient après un certain nombre de simulations une base de données définissant les valeurs d'amplification du run-up en fonction des 5 paramètres prédéfinis.

III.3. Simulation de tsunami à l'aide de VOLNA

VOLNA est un code numérique permettant de modéliser entièrement les tsunamis (origine, propagation et run-up sur la côte). Il consiste en la résolution des Equations Non Linéaires en eau peu profonde (on considère que la profondeur de l'eau et la hauteur de la vague sont beaucoup plus faibles que la longueur de la vague).

Il utilise les notations suivantes : α_0 l'amplitude de la vague, h_0 la profondeur moyenne de l'eau, l_0 la longueur caractéristique de la vague. H est la hauteur totale de l'eau et $\vec{u} = (u, v)(\vec{x}, t)$ est la vitesse horizontale (en moyenne sur la profondeur).

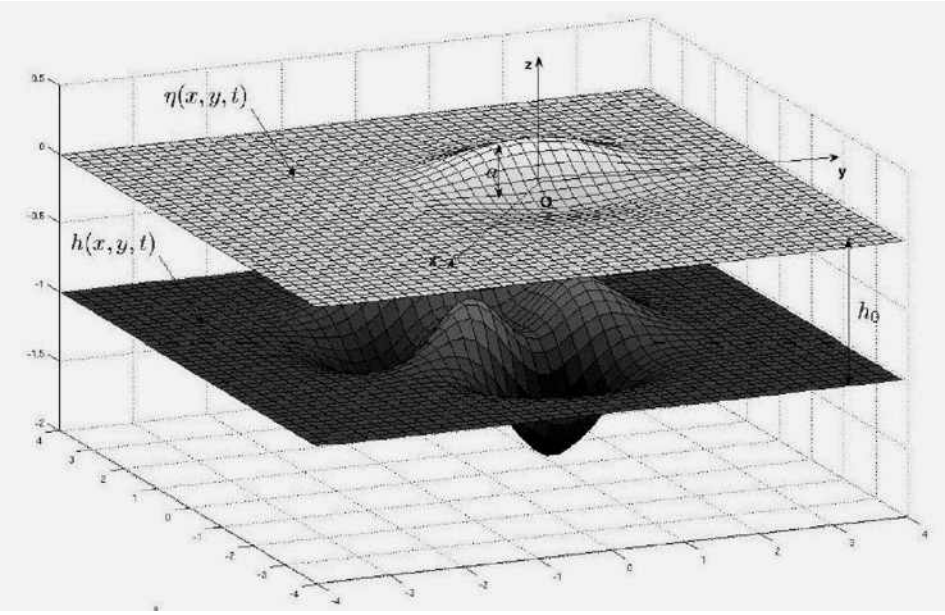

Figure 19 : Schéma du domaine où se développe le tsunami : en haut, la surface de l'eau et en bas, le sol sous-marin **(Denys et *al* 2011).**

Les équations sont les suivantes :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(H\vec{u}) = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial(H\vec{u})}{\partial t} + \nabla(H\vec{u} \otimes \vec{u} + \frac{g}{2}H^2) = gH\nabla h \quad (36)$$

Pour résoudre ces équations de façon discrète, la méthode de résolution utilisée est celle des Volumes Finis et celle de discrétisation du temps est la méthode de Runge-Kutta. La résolution est effectuée sur un maillage triangulaire non uniforme **Denys, et *al* (2011),** de taille 500m et 2m dans les zones qui nous intéressent, c'est-à-dire la zone de la plage située derrière l'île et celle où se situe le point latéral de référence, indépendant de l'île (la plage est située à droite sur le maillage suivant).

Ce maillage triangulaire non uniforme nous permet d'obtenir une meilleure précision là où c'est nécessaire, et d'éviter une précision (et donc des calculs effectués par le logiciel) inutile dans les zones non étudiées.

Afin de déterminer le run-up assez précisément, on positionne des wave-gages (capteurs) linéairement espacés sur la plage entre 0 et 5.5m de hauteur. Ceux-ci vont détecter la hauteur de l'eau (la valeur de û) en fonction du temps, à l'endroit où ils sont situés. Voici un exemple de ce que peut renvoyer un des wave-gages (**figure 20**).

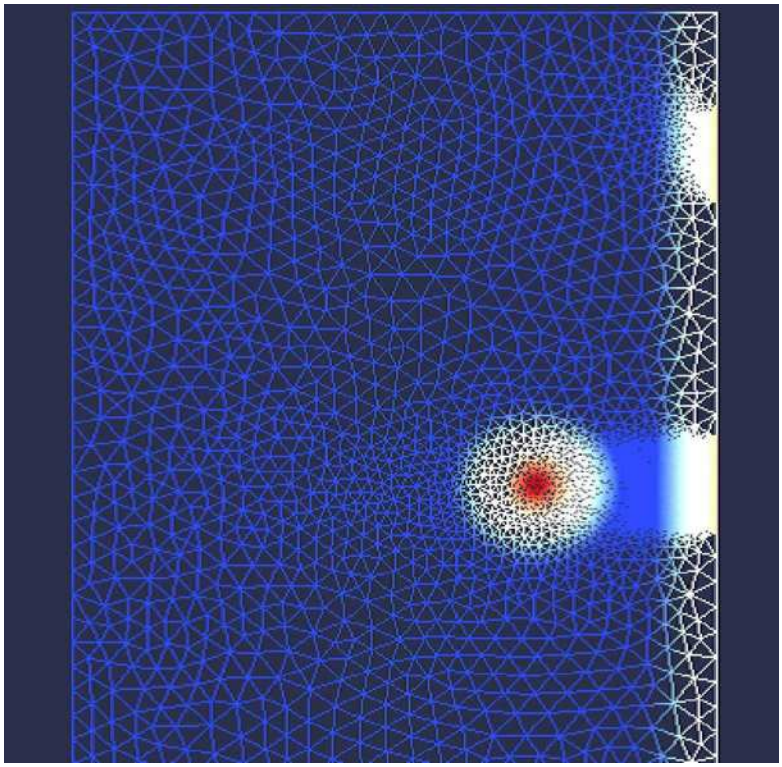

Figure 20: Schéma du maillage **(Denys** et ***al* 2011).**

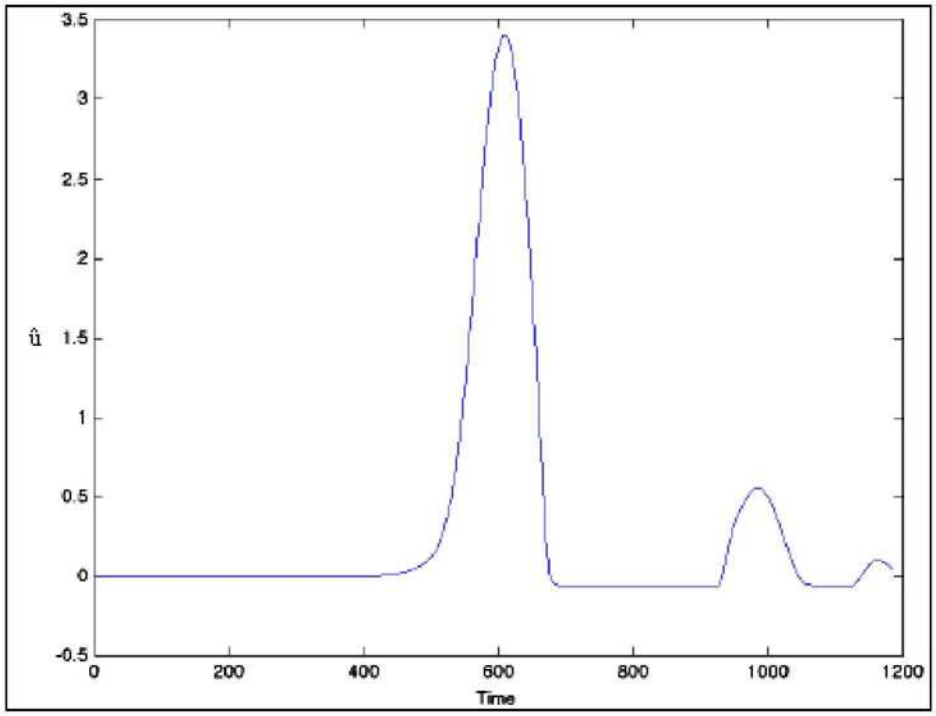

Figure 21: Évolution d'û en un wave-gage au cours du temps **(Denys** et ***al*** **2011).**

L'inconvénient de VOLNA est qu'une simulation nécessite beaucoup de temps, de l'ordre de1h, 1h30. On souhaite donc obtenir le maximum d'information avec un nombre fixé de points calculés. On a donc utilisé la méthode **LHS (Latin HypercubeSampling)** pour déterminer les 5 paramètres physiques (coordonnées d'un point X) de chaque situation qui sera simulée. Cette méthode permet de positionner dans l'espace un nombre fixé de points, de façon à maximiser un certain critère, ici leur distance réciproque. Ceci permet une bonne occupation de l'espace, dite "space-filling". De plus, **Fricker et Urban** ont montré dans leur article que la méthode Latin Hypercube Sampling est plus efficace pour obtenir des points éparpillés dans l'espace que choisir des points aléatoires.

Suivant l'ensemble de points généré par la méthode LHS, ils ont lancé VOLNA sur cet ensemble de simulations. Les simulations effectuées permettre d'étudier le run-up et les paramètres physiques qui le déterminent.

Nature des données

Avant de s'intéresser précisément aux simulations (x_i, y_i, i= 1...200) données par VOLNA, il essaie d'avoir des informations globales sur le problème. Il a donc réalisé un scatterplot, qui représente chaque x_i en fonction de x_j , $i \neq j$, $1 \leq i, j \leq 5$, et colore les points obtenus selon lavaleur de l'amplification du run-up correspondante (bleu pour un run-up faible et rouge pour un run-up élevé). Ils sont seulement sélectionnés ici 2 graphiques parmi les 10 obtenus pour avoir une meilleure visibilité.

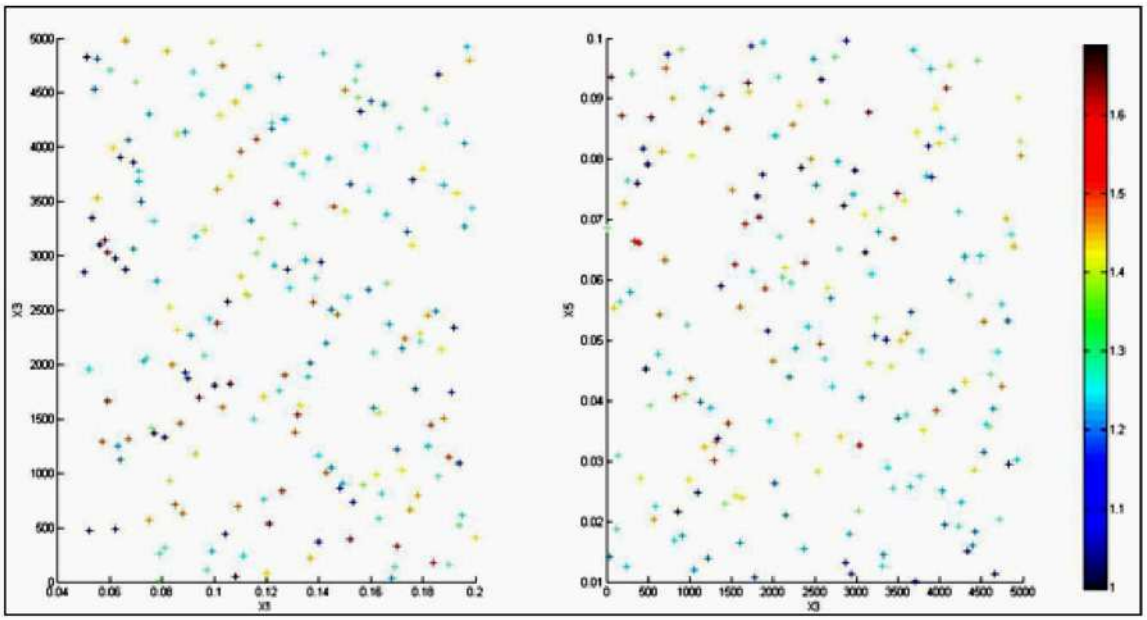

Figure 22:Scatterplots : x_3 en fonction de x_1 et x_5 en fonction de x_3. La couleur des points correspond à la valeur de l'amplification du run-up associée, donnée par le dégradé de couleur **(Denys** et ***al*** **2011).**

Les deux scatterplots de la **figure 22** sont semblables à tous les autres obtenus. Ils remarquent qu'il ne semble pas y avoir de dépendance linéaire entre l'amplification du run-up et les 5 paramètres physiques étudiés. Pour déterminer une fonction qui détermine le run-up selon ces 5paramètres, cette fonction sera donc vraisemblablement non linéaire, et donc difficile à déterminer.

Après cette première étude, Ils peuvent soulever plusieurs problèmes à aborder :

– Tout d'abord, ils souhaitent déterminer quelles sont les conditions qui engendrent la pire situation possible lors d'un tsunami, afin de pouvoir protéger les habitants dans ce cas. Il faudrait donc déterminer le maximum de l'amplification du run-up, pour en trouver les paramètres physiques qui le causent.

– De plus, il faudrait idéalement donner un modèle empirique de l'amplification du run-up en fonction des 5 paramètres physiques, via une fonction f(is, bs, d, h,w) = f(x) =run-up amplification. Cela permettrait de prévoir l'amplification du run-up dans n'importe quelle situation.

– Formellement, on souhaite donc déterminer argmax_x (f(x)) dans un domaine discret des valeurs, et pour lequel on connait f partiellement grâce aux données initiales.

– Nous allons donc avoir recours à l'apprentissage statistique, pour essayer de déterminer cette fonction f telle que, pour X les données et Y les résultats, f(X) soit le plus proche possible de Y.

– Il devient également nécessaire de trouver différentes méthodes afin de diminuer le temps Computationnel au cours d'une expérience, soit en d'autres termes, choisir intelligemment les points que l'on demande à VOLNA. Il sont donc avoir recours à l'apprentissage actif.

Ils sont donc dans un premier temps ils pencher sur l'aspect théorique de l'apprentissage statistique afin de mieux cerner les outils mathématiques qu'ils utiliseront par la suite. Ils arriveront dans un second temps à l'étude de l'apprentissage actif en classification et en régression pour ensuite pouvoir aussi bien adapter leur problème à des algorithmes déjà étudié que créer leur propre algorithme de régression actif. Ils exposeront enfin les résultats expérimentaux, sur plusieurs bases de données réelles et artificielles, afin de souligner l'efficacité et la pertinence de certaine méthode à l'instar de certaines autres.

Conclusion générale

Conclusion :

L'action de la houle sur un talus entraînera une oscillation de la surface de l'eau sur une étendue verticale généralement plus importante que la hauteur de la houle incidente.
Les niveaux extremums atteints par chaque vague sont respectivement appelés run-up, Ru, et run-down, R_d,

Le niveau de run-up peut être utilisé pour déterminer le niveau de la crête d'un ouvrage, la limite supérieure de la protection ou d'autres éléments structurels de l'ouvrage, ou servir d'indicateur de franchissement ou de transmission de la houle. Le niveau de run-down est souvent utilisé pour déterminer l'étendue inférieure de la carapace.

Ce présent travail a détaillé les déférentes caractéristiques du run-up et de run-down on se basant sur un phénomène physique très rependu dans le monde « Tsunamis » par la simulation à l'aide du logiciel VOLNA, qui permit d'estimer le run up afin de minimiser les dégâts causés par les hautes vagues.

Les phénomènes de run-up et run-down sont des phénomènes très importants dans plusieurs domaines notamment l'océanographie, l'ingénierie, la protection et l'aménagement côtiers ; ce qui nécessite de les prendre en considération notamment dans les projets de mise en place de réseau d'alerte au Tsunamis dans les régions susceptibles.

Ahrens, J.P (1981). Irregular wave runup on smooth slopes. CETA no 81-17, US Army corps ofEngrs, *Coastal Engg Research Center,* Fort Belvoir,VA, 26 p

AIPCN (1987). Recommandations pour le dimensionnement et la construction de revêtements souples incorporant des géotextiles pour les voies navigables intérieures. Rapport du In Com GT04,supplément du Bulletin no 57,AIPCN, Bruxelles.

Allsop, N.W.H., Bradbury, A.P., Poole, A.B, Dibb, T.E., et Hughes, D.W (1985). Rock durability in a marine environment. Report SR 11, *Hydraulics Research,Wallingford.*

Batjes, J.A(1974). Surf sirnilarity.*Proc. 14th Coastal Eng. Conf.,* pp 466-480.

Battjes, J.A (1974). Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to windgenerated waves. Report 74-2, Comm on Hydraulics, Dept of Civil Engg, Univ of

Battjes, J.A et Groenendijk, H.W (2000). Wave height distributions on shallow foreshores.bermejillo-Pasajes, Madrid, Espagne.

Briggs, M.J., Synolakis, C.,Harkins, G.E.S etGreen, D.R (1995). *Laboratory*Coastal and Ocean Engg, vol 127, no 5, Septembre/Octobre, pp 254–262.

Costas, E.S et Eddie, N.B (2006).Tsunami science before and beyond boxing day 2004. Philosophical Transactions of the Royal Society A :*Mathematical,Physical and Engineering Sciences*, 364(1845) :2231–2265,

Denys, D, Raphaël, P et Frédéric, D 2011. The VOLNA code for the numerical modeling of tsunami waves: Generation, propagation and inundation. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 30(6):598 – 615.

Dutykh, D., Poncet., R et Dias F (2011). The VOLNA code for the numerical modeling of tsunami waves : Generation, propagation and inundation. *European Journal of Mechanics b/Fluids*, 30(6) ,pp 598 – 615.

Gerwick, B.C (1990). Ice forces on structures.ed, *ocean engineering science – the sea*.Wileyinterscience, New York, vol 9, pt B, pp 1263–1301.

IribarrenCavanilles, R (1938). Una formula para el calculo de los diquesde escollera, *Journal of FluidMechanics*, 374, pp 1–28.

Kanoglu, U et Costas, E.S 1998. Long wave runup on piecewise linear topographies.*Journal of Fluid Mechanics*, 374 :1–28.

Kanoglu, U et Synolakis, C (1998). Long wave runup on piecewise linear topographies.experiments of tsunami runup on a circular island. Pure and Applied Geophysics.

Madsen, P.A et Schaffer, H.A (2010*).* Analytical solutions for tsunami runup on a plane beach : single waves, N-waves and transient waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 645 ,pp 27-57.

Per, A.M et Hemming, A.S 2010. Analytical solutions for tsunami runup on a plane beach : single waves, N-waves and transient waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 645 :27–57.

Seelig, W.N et Ahrens, J.P (1981). Estimation of wave reflection and energy dissipationcoefficients for beaches, revetments and breakwaters. TP81-1, Coastal Engg Res Center, US Army Corps ofEngrs,Vicksburg,MS.

Synolakis, C.E et Bernard, E.N (2006*)*. Tsunami science before and beyond boxing day2004.Philosophical Transactions of the Royal Society A: *Mathematical,Physical and engineering Sciences*, 364(1845) , pp 2231–2265.

TAW (2002). Technisch rapport golfoploop en golfoverslagbijdijken/Wave run-up and waveOvertopping at dikes. Technical report, Technical Advisory Committee on Flood Defence(TAW), Delft.

Thompson, D.M et Shuttler, R.M (1975). Riprap design for wind wave attack. A laboratory Study in random waves. Report EX 707, *Hydraulics Research,Wallingford*.

Thompson, D.M et Shuttler, R.M (1975). Riprap design for wind wave attack. A laboratory studyin random waves. Report EX 707, *Hydraulics Research,Wallingford*

Urban, N.M and Fricker, T.E (2010). A comparison of Latin hypercube and grid ensemble designs for the multivariate emulation of an Earth system model. *Computers et Geosciences*, 36(6), pp 746–755.

Van der Meer, J.W (1988*)*. Rock slopes and gravel beaches under wave attack. PhD thesis,Delft University of Technology, Delft.Also Delft Hydraulics publication no 396.

Van der Meer, J.W etStam, C.J.M (1992). Wave runup on smooth and rock slopes of Coastal structures.J Waterway, Port, *Coastal and Ocean Engg*, vol 118, no 5, Septembre/Octobre,pp 534–550.

Van Gent, M.R.A (2001). Wave runup on dikes with shallow foreshores.*J Waterway, Port, Coastal Engg*, vol 40, no 3, pp 161–182.

Van Gent, M.R.A, d'Angremond, K etTriemstra, R (2002). "Rubble mound breakwaters; single armour layers and high density units". Dans: N W H Allsop (ed) *ProcintconfCoastlines*, Structures and Breakwaters, ICE, London, 26–28.

Site internet:

http://www.meted.ucar.edu/tsunami/tsunamis/, 2010.