



Extrapolation d'essais d'impacts de la houle sur modèles réduits

Jean BOUGIS¹, Didier RIHOUEY², Sébastien BERNARD³, Charlie VERGNET³,
Cyrielle CAYROL⁴, Nicolas GARCIA⁴, Frédéric JOCOU⁵, Alain ROUDIL⁵

1. Cabinet Jean Bougis – Ingénieur Conseil – 32/34 chemin du Moulin 06650 Opio, France. jean.bougis@wanadoo.fr
2. Casagec Ingénierie – 18 rue Maryse Bastié – ZA Maigon – 64600 Anglet, France. rihouey@casagec.fr
3. ACRI-IN – 260 route du pin Montard – BP 234 – 06904 Sophia Antipolis, France. sebastien.bernard@acri-in.fr ; charlie.vergnet@acri-in.fr
4. ARTELIA E & E – 6 rue de Lorraine – 38130 Echirolles, France. Cyrielle.CAYROL@arteliagroup.com ; Nicolas.Garcia@arteliagroup.com
5. Conseil Départemental des Pyrénées Atlantiques – Pôle Pêche et Ports – 25 avenue du commandant Picot – 64500 Ciboure, France. frederic.jocou@le64.fr ; AlainRoudil@le64.fr

Résumé :

La baie de St-Jean-de-Luz/Ciboure est protégée par trois digues d'enclôture en maçonnerie assises sur des talus en enrochements artificiels de 50 t. Les lames déferlantes leur infligent des dommages importants : brèches dans les talus, fissures, fractures et arrachements de maçonnerie. Des études hydrodynamiques, numériques et expérimentales, ont été réalisées pour mieux cerner les conditions d'entretien des digues. Des essais en canal ont été conduits pour évaluer les efforts dus aux lames déferlantes. Afin de séparer les efforts hydrodynamiques (similitude de Froude) des chocs hydrodynamiques (similitude de Cauchy), une loi d'extrapolation a été définie au moyen du modèle de Bagnold. Ses paramètres ont été calés avec des résultats d'essais réalisés à deux échelles. La méthode est présentée et les résultats sont discutés.

Abstract:

St-Jean-de-Luz/Ciboure bay is protected by three breakwaters constructed in masonry on rubble mound foundation with armor units of 50 t. Breaking waves inflict significant damages: breaches in the foundation, cracks, fractures and masonry torn away. Numerical and experimental hydrodynamic studies have been realized to better understand the conditions of maintenance of the breakwaters. Wave flume tests have been conducted to evaluate loads due to breaking waves. To separate hydrodynamic forces (Froude similarity) from hydrodynamic shocks (Cauchy similarity), an extrapolation law was defined using the Bagnold's model. Its parameters have been calibrated with results of model tests on two scales. The method is presented and results are discussed.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Mots-clés : digues verticales, Lames déferlantes, Chocs hydrodynamiques, Essais en canal, Similitudes de Froude, Similitudes de Cauchy.

1. Motivation

Le Département des Pyrénées Atlantiques assure l'entretien des digues d'enclôture de la baie de St-Jean-de-Luz/Ciboure (Socoa, Artha et Sainte Barbe) construites à la fin du XIX^e siècle. Ces digues en maçonnerie sont assises sur des talus en enrochements artificiels de 50 t. Des dommages ont été observés sur les digues d'Artha et de Socoa :

- des brèches dans les talus nécessitant l'immersion de 30 à 50 blocs artificiels par an,
- des fissures, des fractures verticales et des arrachements de maçonnerie.

Le CG64 a confié à la société Casagec Ingénierie et au Cabinet Jean Bougis (BOUGIS, 2015) une mission d'AMO pour la réalisation d'études hydrodynamiques numériques (houles incidentes devant les digues) et expérimentales concernant les digues d'Artha et de Socoa.

Les dommages aux maçonneries sont essentiellement dus aux pressions et efforts induits par les impacts des lames déferlantes sur les parois des deux ouvrages. Les conditions de stabilité des carapaces des talus, comme les efforts hydrodynamiques et les pressions d'impacts sur les parements en maçonnerie ne pouvant pas être cernés par des modèles numériques, il a fallu recourir à des essais sur modèles physiques.

2. Problématique et méthodologie

Les chocs hydrodynamiques induisent des efforts de pression d'origine incompressible (impact des lames) dits chocs hydrodynamiques et des efforts d'origine compressible (compression de l'air par les crêtes déferlantes) dits chocs acoustiques. Dans le premier cas, la référence de pression est arbitraire (pression nulle à la surface libre). Dans le second cas, la loi de compressibilité des gaz impose la référence à la pression absolue. Ces deux types d'efforts relèvent donc respectivement de la similitude de Froude et de la similitude de Cauchy, dont le respect simultané n'est pas possible en modèle réduit. Le respect de la similitude de Froude étant incontournable pour la modélisation de la houle, les essais doivent être réalisés avec une distorsion de la similitude de Cauchy qui conduit à des efforts d'impacts compressibles très surestimés par la similitude de Froude.

Pour pallier cette limitation, on a procédé en trois étapes :

- formulation d'une loi d'extrapolation paramétrique fondée sur l'analyse dimensionnelle et le modèle de (BAGNOLD, 1939) ;
- réalisation de modèles physiques en canal sur une section caractéristique de chacune des digues d'Artha et de Socoa (pente des fonds, talus et superstructure) à deux échelles différentes au 1/30 (ARTELIA 2015a & 2015b) et au 1/60 (ACRI-IN, 2015) ;
- calage des paramètres de la loi pour faire converger les deux extrapolations.

3. Notations

- c : célérité du son dans l'air,
- g : accélération de la pesanteur ($g=9.81 \text{ m/s}^2$),
- h : profondeur d'eau,
- H : hauteur crête à creux de la houle,
- p : pression de l'air,
- p_0 : pression atmosphérique normale $p_0=\rho_{a0} c_0^2/\gamma$,
- U : vitesse dans le fluide.
- γ : coefficient isentropique qui est égal à $\gamma=7/5=1.4$ pour les gaz diatomiques,
- ρ_a : masse volumique de l'air,
- ρ_e : masse volumique de l'eau,
- λ_G : Echelle géométrique.

4. Extrapolation des pics

4.1 Lois de similitudes pour les écoulements incluant des chocs

La pression n'intervient dans l'équation de Navier-Stokes que par son gradient. Elle est donc définie à une constante près qui peut être choisie en retenant la pression atmosphérique au-dessus de la surface libre comme origine des pressions. En profondeur finie, la similitude des écoulements de l'eau est gouvernée par la conservation du nombre de Froude (rapport des efforts d'inertie aux efforts de gravité) :

$$\text{Fr} = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

La pression absolue de l'air s'impose comme la pression de référence puisqu'elle intervient directement dans la loi de comportement des gaz. La similitude des écoulements de l'air est gouvernée par la conservation du nombre de Cauchy (rapport des efforts d'inertie aux efforts de compression élastique) :

$$\text{Ca} = \frac{\rho_e U^2}{\rho_{a0} c_0^2} = \frac{\rho_e U^2 / \gamma}{\rho_{a0} c_0^2 / \gamma} = \frac{\rho_e U^2}{\gamma p_0} \quad (2)$$

La similitude de Froude est incontournable pour les essais. Les vitesses sont alors réduites comme $\lambda_G^{1/2}$. ρ_e , γ et p_0 étant quasi constants, le nombre de Cauchy varie comme λ_G , ce qui induit une distorsion de la similitude de Cauchy qui doit être corrigée lors de l'extrapolation au réel des pics de pression acoustique mesurés sur les modèles. Notons que le nombre de Weber (similitude de tension superficielle) varie comme λ_G^2 , tandis que la similitude de Reynolds (similitude des efforts visqueux) varie comme $\lambda_G^{3/2}$.

4.2 Modèle théorique de BAGNOLD (1939)

En similitude de Froude, les pressions sont à l'échelle géométrique $\lambda_{\text{Fr}}=\lambda_G$. En similitude de Cauchy, le coefficient d'extrapolation λ_{Ca} à appliquer aux pics de pression s'écrit :

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

$$\lambda_{Ca} = \left[\frac{p_{\max} - p_0}{p_0} \right]_P / \left[\frac{p_{\max} - p_0}{p_0} \right]_M = \frac{p_{\max P} - p_0}{p_{\max M} - p_0} \quad (3)$$

La théorie élaborée par (BAGNOLD, 1939) pour définir ce coefficient est utilisée par de nombreux auteurs. La lame déferlante est assimilée à un volume d'eau de hauteur H et de longueur L qui se déplace vers le mur à la vitesse u_0 . Lorsqu'elle approche de la paroi à une distance D , la lame d'air de hauteur H et d'épaisseur D est piégée. La lame d'eau agit alors comme un piston. L'air qui ne peut plus s'échapper, subit une compression adiabatique jusqu'à ce que l'eau frappe le mur. Cette approche analytique permet d'obtenir l'équation de Bagnold, où Ba désigne le nombre de Bagnold :

$$Ba = 1.4 \frac{L}{D} Ca = 5 \left(\frac{p_{\max}}{p_0} \right)^{\frac{2}{7}} + 2 \left(\frac{p_{\max}}{p_0} \right)^{-\frac{5}{7}} - 7 \quad (4)$$

4.3 Effet des échappements d'air

La pression maximale atteinte lors de l'impact dépend de la quantité d'air confinée par la crête de la lame ; laquelle est conditionnée par la distance entre le point de déferlement et le mur. On distingue quatre types de chocs hydrodynamiques pour un point de déferlement se déplaçant du large vers le mur (HOFLAND *et al.* 2010).

- i) L'impact aéré : lorsque le point de déferlement est suffisamment éloigné du mur, la crête retombe sur la surface libre et c'est une masse d'eau aéré qui vient frapper le mur.
- ii) L'impact à poche d'air : lorsque le point de déferlement est situé assez loin du mur pour que le tube de déferlement se développe, mais assez près du mur pour que la crête viennent toucher le mur avant de retomber, elle enferme une poche d'air avant l'impact.
- iii) L'impact à tube clos : lorsque le point de déferlement est suffisamment près du mur, le creux remonte le long du mur sous l'effet du run-up et rejoint la crête au moment de l'impact de sorte que l'essentiel de l'air est chassé du tube avant l'impact.
- iv) L'impact de ballotement : lorsque le point de déferlement est situé après le mur, le run-up fait monter une lame d'eau le long du mur plus haut que la crête de la vague qui vient s'écraser sur cette lame d'eau et non directement sur le mur.

Les trois derniers types d'impact sont les plus violents.

Lorsque la lame approche du mur, il une partie de l'air enfermé dans la poche peut s'échapper vers le haut le long du mur. Il en résulte une diminution du pic de pression qui est moins importante sur le prototype que sur le modèle réduit (TAKAHASHI *et al.* 1985). Lors des essais de nombreux impacts ont été observés, mais seulement quelques uns ont produit un claquement sec, tel un sac en papier qu'on éclate entre les mains.

Lorsqu'on s'intéresse à la phénoménologie physique, ce phénomène doit être pris en compte sous une forme permettant de le quantifier (CUOMO *et al.* 2010). Par contre, lorsqu'on s'intéresse au risque statistique du dépassement d'une pression donnée, il n'est pas indispensable d'expliquer la distribution obtenue ; il suffit que le nombre de lames soit assez important pour que la queue de distribution soit statistiquement réaliste.

4.4 Rapport L/D

Dans la relation (4), le rapport entre la pression maximale et la pression atmosphérique dépend du nombre de Cauchy et du rapport L/D particulièrement délicat à évaluer.

- (BAGNOLD 1939) a évalué L à $0.2H$ et a considéré que D est inclus de manière équiprobable dans l'intervalle $[0, L]$. Sans évaluer D , il en déduit que D/L correspond à la probabilité que le pic de pression dépasse la valeur fournie par l'équation (4).
- (TAKAHASHI *et al.* 1985) ont assimilé la masse d'eau impliquée dans le choc à la masse d'eau ajoutée d'une plaque plane de largeur $2H$; soit $L = \pi H/4$. Ils ont déduit d'essais que D est compris dans l'intervalle $[0.5H, H]$. En fait l'essentiel de leurs essais fournissent des résultats compris dans l'intervalle $[0.5H, 0.8H]$. Cela correspond à la condition $0.79 \leq L/D \leq 1.56$, voire plutôt $0.98 \leq L/D \leq 1.56$.
- Plus récemment, (CUOMO *et al.* 2010) ont proposé les expressions : $L = 0.2(1 - \pi/12)H_{m0}$ et $D = \pi H_{m0}/12$. La première est du même ordre que celle retenue par Bagnold et sensiblement inférieure à celle retenue par Takahashi *et al.* La seconde est bien inférieure à celle obtenue par Takahashi *et al.* Le rapport L/D est alors égal à 0.56.

Devant le fondement physique approximatif, la dispersion et la difficulté de ces évaluations, nous avons préféré évaluer le rapport L/D sur des bases plus physiques.

ADEYEMO (1967) a étudié les dissymétries de forme (horizontale, verticale, pente et vitesses) des houles pré-déferlantes sur des pentes comprises entre 1/18 et 1/4. Il utilise le rapport H_a entre la distance horizontale entre une crête et l'intersection avec le niveau moyen de la surface libre qui la précède et la distance horizontale entre la même crête et l'intersection avec le niveau moyen de la surface libre qui la suit (voir figure 1 a).

En assumant l'hypothèse que $D/L \approx H_a$, pour les très faibles pentes et les $thkh$ variant de 0.45 à 1.00, le coefficient H_a varie entre 0.60 et 1.00. Pour les très faibles profondeurs relatives ($h/\lambda < 0.08$) la dispersion des résultats est importante en raison des difficultés à obtenir des houles stables. Ainsi, le rapport L/D varie entre 1.00 et 1.67.

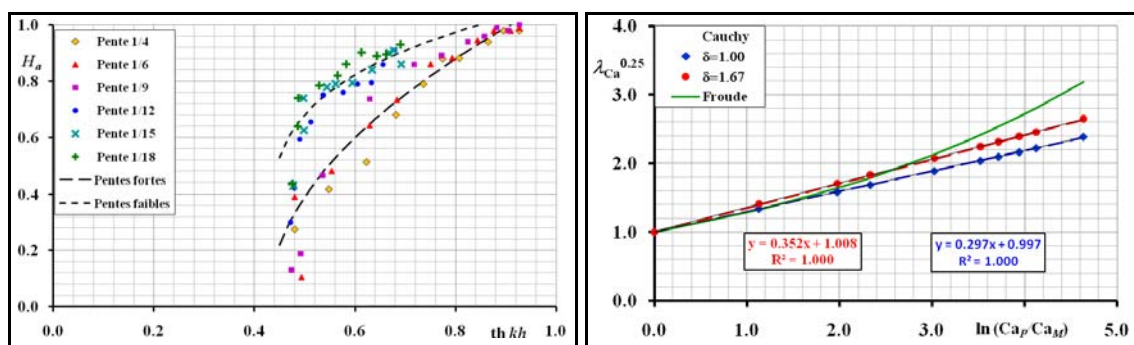


Figure 1. a) Dissymétrie des houles – b) Extrapolation des pics de pression.

4.5 Loi d'extrapolation

Le modèle de Bagnold permet de poser le cadre théorique et d'aboutir à une relation rigoureuse du point de vue dimensionnel qui reste à valider expérimentalement. Le rap-

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

port $\delta=L/D$ joue le rôle d'un paramètre de forme de la houle qui peut inclure des notions plus complexes que le seul rapport de ces longueurs. Réécrivons le nombre de Cauchy avec la vitesse de la houle au déferlement $U_B = \sqrt{g(h+H_s)}$:

$$Ca = \frac{\rho_e U_B^2}{\rho_{a0} c_0^2} = \frac{\rho_e g (h+H_s)}{\mathcal{P}_0} \quad (5)$$

g , γ et p_0 sont égaux sur le prototype et sur le modèle, mais pas ρ_e (eau de mer et eau douce). Le nombre Ca s'écrit donc en fonction de la profondeur h en pied de l'ouvrage et de H_s :

$$Ca_P = 0.0710(h+H_s) \text{ et } Ca_M = 0.0692(h+H_s) \quad (6)$$

La relation (4) permet de tracer la courbe $Ba = f(p_{\max}/p_0)$ en fonction de l'échelle ; les rapports $p_{\max P}/p_0$ et $p_{\max M}/p_0$ et leur rapport sont associés aux nombres de Cauchy :

$$\lambda_{Ca}(\delta, h, H_s, T_p) = \frac{p_{\max P} - p_0}{p_{\max M} - p_0} \quad (7)$$

Ce qui permet d'obtenir la relation empirique paramétrique de la forme suivante :

$$\lambda_{Ca}^{0.25} = 1 + f(\delta, h, H_s, T_p) \ln \frac{Ca_P}{Ca_M} \quad (8)$$

La figure 1 b) montre ce résultat pour $N=5.25$ m CM, H_{\max} déferlante et $T_p=16$ s.

Il convient de remarquer que cette approche ne prend pas en compte la variation du rapport δ avec la variation d'échelle, ni celle de la forme des lames déferlantes ; lesquelles sont essentiellement dues à la distorsion de la similitude de Weber.

5. Essais sur modèles physiques

Pour vérifier la cohérence de l'extrapolation, il a été décidé de recourir à des essais à deux échelles géométriques différentes :

- des essais au 1/30 qui ont été réalisés dans le laboratoire d'ARTELIA à Grenoble,
- des essais au 1/60 réalisés dans le laboratoire d'ACRI-IN à Sophia Antipolis ;

et de vérifier ainsi que les deux valeurs de λ_{Ca} obtenues aux deux échelles conduisent à des pics de pressions comparables sur le prototype avec une précision acceptable.

Les essais ont été réalisés pour trois niveaux d'eau :

- la pleine mer de vives eaux moyennes : +4.30 m CM,
- le niveau de durée de retour décennal : +5.10 m CM,
- le niveau de durée de retour centennal : +5.25 m CM.

Les essais ont été réalisés pour des houles régulières avec les hauteurs $H_{2\%}$ et pour les états de mer d'une durée de 6 heures au réel (1500 à 1900 vagues) dont les caractéristiques au large sont :

- Durée de retour décennale courte : $H_s = 12.8$ m $H_{2\%} = 17.9$ m $T_p = 16.0$ s ;
- Durée de retour décennale longue : $H_s = 12.8$ m $H_{2\%} = 17.9$ m $T_p = 18.0$ s ;
- Durée de retour centennale moyenne : $H_s = 16.9$ m $H_{2\%} = 23.7$ m $T_p = 20.0$ s.

Les mesures ont concerné les pressions, les efforts et moments sur une tranche de la digue, les franchissements et l'analyse de la stabilité hydraulique du massif de blocs.

5.1 Essais au 1/30 (ARTELIA, 2015a & 2015b)

Les essais au 1/30 ont été réalisés dans l'un des canaux à houle (longueur 31 m, largeur 1.0 m, hauteur 2.0 m) du laboratoire d'ARTELIA à Pont-de-Claix près de Grenoble. Le canal est équipé d'un batteur à houle de type volet et d'un système d'absorption active. Les fonds sont représentés en contreplaqué depuis l'isobathe -24 m CM jusqu'au pied des ouvrages, respectivement -10.0 m CM et -7.5 m CM pour l'Artha et de Socoa.

Les modèles des ouvrages incluent le mur de couronnement en maçonnerie et sa semelle représenté par un coffrage plein en PVC, assis sur un noyau en matériau granulaire fin et protégé par une berme en blocs parallélépipédiques en béton de 50 t (20 m³) respectivement arasée à +1.26 m CM et +2.00 m CM pour l'Artha et Socoa, représentés par des blocs en béton de 1840 g par unité (13.3 cm x 8.3 cm x 6.7 cm) posés aléatoirement.

Huit sondes capacitatives ont été déployées dans le canal pour la mesure des vagues en amont de l'ouvrage. Le parement des digues a été équipé de quatre capteurs piézo-électriques, avec une fréquence de résonance ≥ 60 kHz, pour la mesure des pressions et d'une balance six composantes pour la mesure des efforts et des moments. La fréquence d'échantillonnage était de 10kHz. Les capteurs piézo-électriques se sont révélés insensibles à l'aération des lames déferlantes. Des capteurs piézo-résistifs ont été testés puis abandonnés en raison de leur incapacité à suivre le pic de pression trop rapide.



Figure 2. Modèle de l'Artha (ARTELIA) en cours d'essai en houle régulière ($T = 16$ s, $H = 6$ m) avec un niveau d'eau de +4,30 m CM.

5.2 Essais au 1/60 (ACRI-IN, 2015)

Les essais au 1/60 ont été réalisés dans le canal à houle (longueur 31 m, largeur 1.8 m, hauteur 1.8 m) du laboratoire d'ACRI-IN à Sophia Antipolis. Le canal est équipé d'un batteur à houle de type piston et d'un plancher mobile permettant de représenter les fonds depuis l'isobathe -20 m CM jusqu'au pied des ouvrages, respectivement -10.0 m CM et -7.5 m CM pour l'Artha et Socoa.

Les modèles des ouvrages incluent le mur de couronnement en maçonnerie et sa semelle

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

représenté par un coffrage plein en bois, assis sur un noyau en matériau granulaire fin « grains de riz » et protégé par une berme en blocs parallélépipédiques en béton de 50 t (20 m³) représentés par des blocs en béton de 230 g par unité (6.7 cm x 4.2 cm x 3.3 cm) posés aléatoirement avec une porosité moyenne de 30 %.

L'instrumentation commune aux deux modèles était composée de 6 sondes limnimétriques réparties en deux groupes pour mesure et contrôle de la houle incidente en deux points en amont de l'ouvrage, dont un par -20 m CM (à échelle prototype) commun aux deux modèles, 1 balance dynamométrique triaxiale pour mesure du torseur d'effort global sur une section du mur maçonné de couronnement (résultantes verticale et horizontale, moment de basculement), 5 capteurs de pression placés sur la face avant du mur de couronnement pour mesure du profil vertical de pression.

La fréquence d'échantillonnage était de 20 kHz. Un filtre analogique passe bas à 10 kHz était placé en sortie des conditionneurs, en amont du système d'acquisition numérique.



Figure 3. a) Modèle de l'Artha – b) Modèle de Socoa (ACRI-IN, 2015).

6. Extrapolation des pics

6.1 Résultats d'essais

Pour chaque essai, les courbes de probabilité de dépassement ont été tracées et extrapolées pour permettre la comparaison des hauteurs $H_{1.0\%}$, $H_{0.5\%}$, $H_{0.1\%}$ entre les échelles.

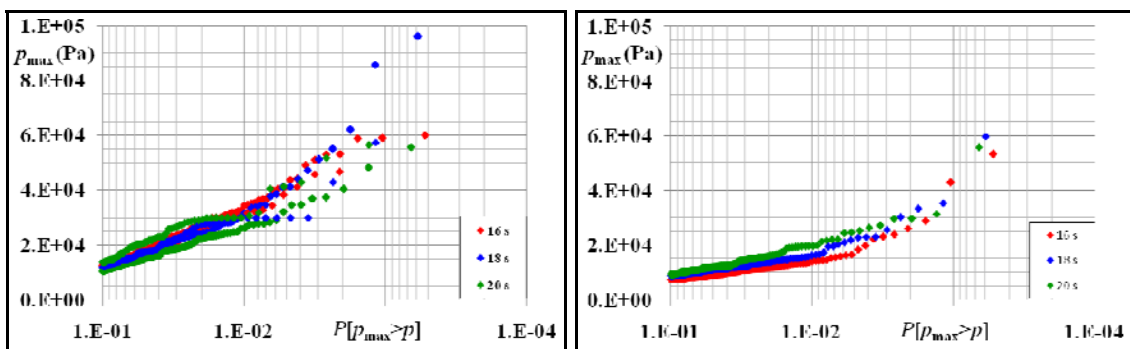


Figure 4. Artha, pression maximale, états de mer 100 ans, $N=5.25$ m, a) 1/30 – b) 1/60.

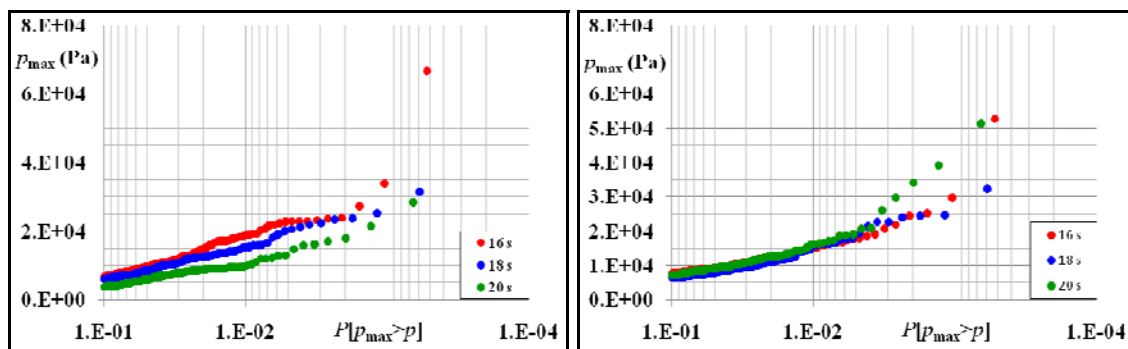


Figure 5. Socoa, pression maximale, états de mer 100 ans, $N=4.30$ m, a) 1/30 – b) 1/60.

Cette approche stochastique permet de s'affranchir des effets des fuites d'air et d'encadrer les variations du rapport L/D .

Les figures 4 et 5 montrent les résultats obtenus aux deux échelles respectivement pour la digue d'Artha et pour la digue de Socoa pour l'état de mer centennal au niveau haut.

6.2 Coefficients d'extrapolation

Le tableau 1 rassemble les caractéristiques des coefficients d'extrapolation pour les deux similitudes de Froude et de Cauchy pour les deux digues d'Artha et de Socoa.

Les résultats présentés ci-dessus, montrent que l'extrapolation des pics de pression acoustique surestime les sollicitations de 20 à 35% au 1/30 et de 65 à 100% au 1/60. Sauf à recourir à des essais à grande échelle, il convient donc de corriger la distorsion de similitude de Cauchy.

Tableau 1. Coefficients d'extrapolation.

Echelle géométrique		1	1/30	1/60
Coefficient d'extrapolation des longueurs		1	30	60
Coefficient d'extrapolation des masses volumiques de l'eau		1.000	1.026	1.026
<i>Pressions et efforts hydrodynamiques – similitude de Froude (Artha et Socoa)</i>				
Coefficient d'extrapolation des longueurs		1	30	60
Coefficient d'extrapolation des pressions	Pa	1.0	30.8	61.6
<i>Pressions et efforts acoustiques – similitude de Cauchy pour la digue d'Artha</i>				
Coefficient d'extrapolation des longueurs		1	25.2±1.0	35.8±1.0
Coefficient d'extrapolation des pressions	Pa	1.0	25.9	36.7
<i>Pressions et efforts acoustiques – similitude de Cauchy pour la digue de Socoa</i>				
Coefficient d'extrapolation des longueurs		1	22.0±0.8	30.6±0.9
Coefficient d'extrapolation des pressions	Pa	1.0	22.6	31.4

7. Conclusion

Le modèle de Bagnold permet de définir un cadre théorique. La justesse de son utilisation reste toutefois subordonnée à trois conditions, souvent satisfaites de manière trop approximative, et que nous nous sommes efforcés de préciser.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

- 1) Les travaux d'Adeyemo sur la dissymétrie des lames pré-déferlantes ont été utilisés pour donner une assise physique à l'évaluation du paramètre de forme $\delta=L/D$.
 - 2) La question de l'échappement d'air a été évacuée au profit d'une approche stochastique ; ce que Bagnold avait implicitement pris en compte dans sa définition de D/L .
 - 3) La détermination d'une loi empirique affine (8) entre $\lambda_{Ca}^{0,25}$ et $\ln(Ca_P/Ca_M)$.
- Cette approche a été ensuite globalement validée par des résultats d'essais réalisés à deux échelles et qui fournissent des extrapolations cohérentes.

8. Remerciement

Cette étude a été réalisée avec le soutien de fonds de l'Etat et de fonds européens.

9. Références bibliographiques

ADEYEMO M.D. (1967). *Wave transformation and velocity fields in the breaker zone*. Ph.D. Thesis, University College London.

ACRI-IN (2015). *Etude des efforts d'impact sur les digues d'Artha et de Socoa*. Rapport d'essais en canal à houle n° IN 1050/1309.

ARTELIA (2015a). *Essais sur modèle physique 2D de la digue de l'Artha*. Rapport n°8 71 3589, rev0.

ARTELIA (2015b). *Essais sur modèle physique 2D de la digue de Socoa*. Rapport n°8 71 3589, rev0.

BAGNOLD R.A. (1939). *Interim report on wave pressure research*. Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 12(7), pp 202-226. <http://dx.doi.org/10.1680/ijoti.1939.14539>

BOUGIS J. (2015). *Analyse des essais en canal à houle des digues d'Artha et de Socoa*. Rapport d'étude, rapport n° RET.13.682.03.01.

BULLOCK G.N., CRAWFORD A.R., HEWSON P.J., WALKDEN M.J.A., BIRD P.A.D. (2001). *The influence of air and scale on wave impact pressures*. Coastal Engineering, Vol. 42(4), pp 291-312. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00065-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00065-X)

CUOMO G., ALLSOP W., TAKAHASHI S. (2010). *Scaling wave impact pressures on vertical walls*. Coastal Engineering, Vol. 57(6), pp 604-609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.01.004>

GUILCHER P.M., BROSSET L., COUTY N., LE TOUZE D. (2012). *Simulations of breaking wave impacts on a rigid wall at two different scales with a two phase fluid compressible SPH model*. Proc. 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, (ISOPE).

HOFLAND B., KAMINSKI M.L., WOLTERS G. (2010). *Large scale wave impacts on a vertical wall*. 32nd International Conference on Coastal Engineering, Structures, n°15, 15p., Shangai, China.

TAKAHASHI S., TANIMOTO K., MIYANAGA S. (1985). *Uplift wave forces due to compression of enclosed air layer and their similitude law*. Journal of Coastal Engineering of Japan, Vol. 28, pp 191-206.