

## **Etude expérimentale de la formation de ressauts ondulés sur un récif frangeant**

**Marion TISSIER<sup>1</sup>, Jochem DEKKERS<sup>1</sup>, Ap VAN DONGEREN<sup>2</sup>,  
Stuart PEARSON<sup>1,2</sup>, Ad RENIERS<sup>1</sup>**

1. Delft University of Technology, Department of Hydraulic Engineering, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, Pays-Bas.  
*M.F.S.Tissier@tudelft.nl; J.M.Dekkers@student.tudelft.nl; J.H.M.Reniens@tudelft.nl; S.G.Pearson@tudelft.nl*
2. Deltares, Department of Applied Morphodynamics, Unit of Marine and Coastal systems Boussinesqweg 1, 2629 HV Delft, Pays-Bas. *Ap.vanDongeren@deltares.nl*  
*Ap.vanDongeren@deltares.nl*

### **Résumé :**

L'hydrodynamique sur les récifs frangeants est généralement dominée par des ondes longues, dites infragravitaires. Une bonne compréhension de leur transformation sur les récifs est donc primordiale pour mieux comprendre et prédire les risques de submersion dans de tels environnements. Dans cette étude, nous analysons la transformation de vagues longues (houle et ondes infragravitaires) en ressauts ondulés sur un récif frangeant à partir d'une série d'expériences en canal (échelle 1/20). L'objectif de ces expériences est de caractériser l'effet de ces transformations sur l'hydrodynamique du platier récifal et ses conséquences sur les mouvements de la ligne d'eau sur la plage qui y est accolée. Nous présentons ici les résultats obtenus pour 6 cas de vagues régulières, choisis de manière à ce que leurs caractéristiques soient représentatives de houles longues ( $T_{\text{prototype}} \approx 20$  s) et d'ondes infragravitaires ( $T_{\text{prototype}} \approx 45 - 90$  s). Nous montrons que des ressauts ondulés se développent dans tous les cas considérés, et que ces transformations modifient significativement le spectre d'énergie. Dans le cas des ondes de type infragravitaire, cela peut résulter en une diminution importante (jusqu'à 80%) de l'énergie initialement contenue dans les basses fréquences lorsque les vagues atteignent le bas de plage.

### **Mots-clés :**

Hydrodynamique littorale, Ondes infragravitaires, Récifs frangeants, Transferts d'énergie

## Thème 1 – Hydrodynamique côtière

### 1. Introduction

Les récifs frangeants se trouvent souvent dans des archipels coralliens de basse altitude, particulièrement vulnérables aux risques de submersion. Ces épisodes de submersion n'ont pas seulement des conséquences directes d'un point de vue économique et humain, mais ont aussi des effets affectant la vie sur ces archipels à plus long terme, tels que la salinisation des nappes d'eaux souterraines (WHITE *et al.*, 2007).

De nombreuses études ont montré que les ondes longues de type infragravitaire dominant généralement l'hydrodynamique sur le platier récifal et les mouvements de la ligne d'eau sur la plage qui y est adjacente (e.g., CHERITON *et al.*, 2016 ; NWOGU & DEMIRBILEK, 2010). Celles-ci jouent donc un rôle majeur lors d'épisodes de submersion. Pourtant, plusieurs aspects de la transformation des ondes longues sur les récifs sont encore mal compris. Le platier récifal, de pente très faible, permet par exemple aux effets non-linéaires et dispersifs d'agir sur une longue distance. L'accumulation de ces effets peut résulter en des modifications significatives des fronts d'ondes. Ceux-ci peuvent se raidir et déferler, ou, alternativement, se transformer en ressauts ondulés (*undular bores* en anglais, voir PEREGRINE (1966) pour une explication physique de leur développement). De tels ressauts ont été observés sur des récifs coralliens (par exemple GALLAGHER, 1972), mais les conséquences de leur développement sur l'hydrodynamique du récif n'ont jamais été étudiées. Pourtant, la formation de ressauts ondulés est susceptible de modifier de manière significative le champ de vague sur la partie interne du récif, et donc les mouvements de la ligne d'eau sur la plage adjacente.

Dans ce papier, nous présentons les premières analyses d'une série d'expériences en canal à houle spécifiquement conçues pour étudier la transformation de la houle et des ondes infragravitaires en ressauts ondulés sur un récif frangeant. Les conséquences de ces transformations en termes de transferts d'énergie entre basses et hautes fréquences sont en particulier analysées.

### 2. Description des expériences de laboratoire

Les expériences se sont déroulées dans le laboratoire hydraulique de l'Université de Delft. Le canal à houle utilisé fait approximativement 38 m de long, et est équipé d'un batteur piston avec système de compensation à réflexion active (ARC). La bathymétrie est présentée figure 1. Notre platier récifal est lisse et horizontal, d'une largeur de 20 m correspondant à 400 m de large en dimensions réelles (échelle de longueur  $n_L=20$ ). Il est accolé à une plage de pente 1:5. La profondeur au large est de 60 cm, correspondant à une profondeur sur le plateau du récif de 8.1 cm.

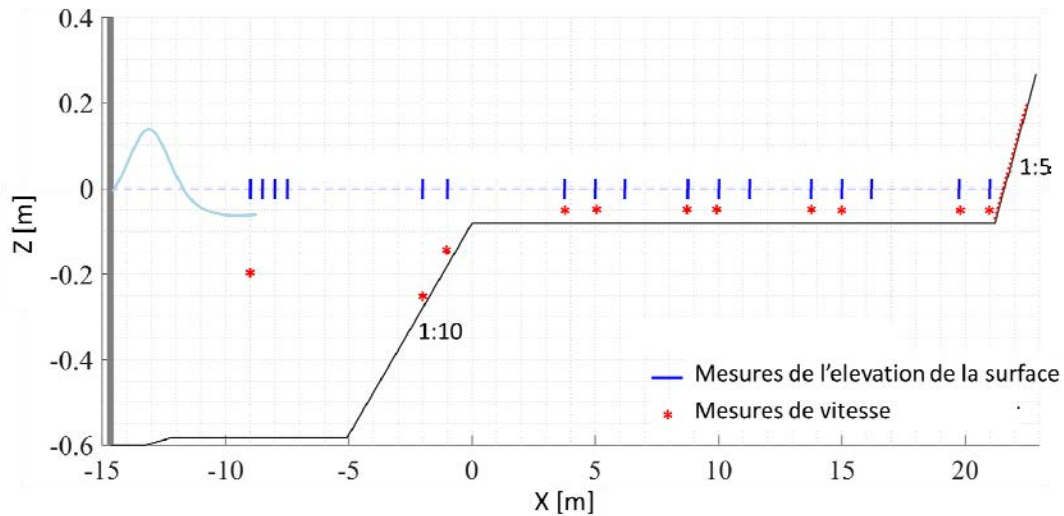


Figure 1. Bathymétrie et positionnement des instruments.

Plusieurs types de vagues ont été générés. Dans ce papier, nous nous focalisons sur les vagues régulières. Les 6 conditions de vagues analysées dans ce papier sont de type cnoïdal (voir caractéristiques Tableau 1). Conditions R1 et R2 sont des vagues régulières dont les caractéristiques, une fois à l'échelle, sont celles d'une houle assez longue ( $T_{\text{prototype}} \approx 20\text{s}$ ). Conditions R3-R6 ont été choisies pour représenter des vagues de type infragravitaire ( $T_{\text{prototype}} \approx 45\text{-}90\text{ s}$ ).

L'élevation de la surface libre est mesurée à 17 positions le long du canal. A 11 d'entre elles, la vitesse est également mesurée, permettant la séparation des ondes incidentes et réfléchies utilisant une adaptation de la méthode présentée par GUZA *et al.* (1984). Les mouvements de la ligne d'eau sont également mesurés, mais non analysés dans ce papier. Pour une description plus complète du jeu de données, voir le rapport de DEKKERS (2018).

Tableau 1. Période  $T$  et hauteur  $H$  pour les conditions de vagues cnoïdales analysées. Une estimation de la longueur d'onde sur le récif ( $L_{\text{recif}} = (gh_{\text{recif}})^{1/2} T$ ) est aussi indiquée.

	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
$T$ (s)	5	5	10	10	20	20
$H$ (cm)	4	8	2	4	2	4
$T_{\text{prototype}}$ (s)	22,3	22,3	44,7	44,7	89,4	89,4
$H_{\text{prototype}}$ (m)	0,8	1,6	0,4	0,8	0,4	0,8
$L_{\text{recif}}$ (m)	4.5	4.5	8.9	8.9	17.8	17.8

## *Thème 1 – Hydrodynamique côtière*

### **3. Résultats**

#### 3.1 Description générale de la transformation des ondes longues sur le platier récifal

##### *3.1.1 Vagues régulières de type houle (Cas R1 et R2)*

La transformation des vagues sur le récif est similaire dans les cas R1 et R2. Les séries temporelles d'élévation de la surface libre pour l'onde incidente (en noir) et réfléchie (en rouge) sont présentées figure 2g-1 pour le cas de houle le plus énergétique R2. Les vagues lèvent et raidissent rapidement sur la pente externe du récif (figure 2h) avant de déferler de manière plongeante à proximité de la crête du récif, comme le montre la différence de hauteur de vague entre  $x=-1$  (h) et  $x=5$  m (i). Après quelques mètres, le déferlement stoppe et la vague incidente se reforme et commence à onduler. L'amplitude et la longueur d'onde des ondulations croient ensuite progressivement le long du récif (i-k). Quand elle arrive au pied de plage ( $x=21$ m, figure 2-l) l'onde longue initiale ne peut quasiment plus être distinguée (période apparente de l'ordre de 1.3 secondes, soit 3.8 fois plus courte que la durée séparant deux crêtes consécutives au début du récif).

##### *3.1.2 Vagues régulières de type infragravitaire (Cas R3-R6)*

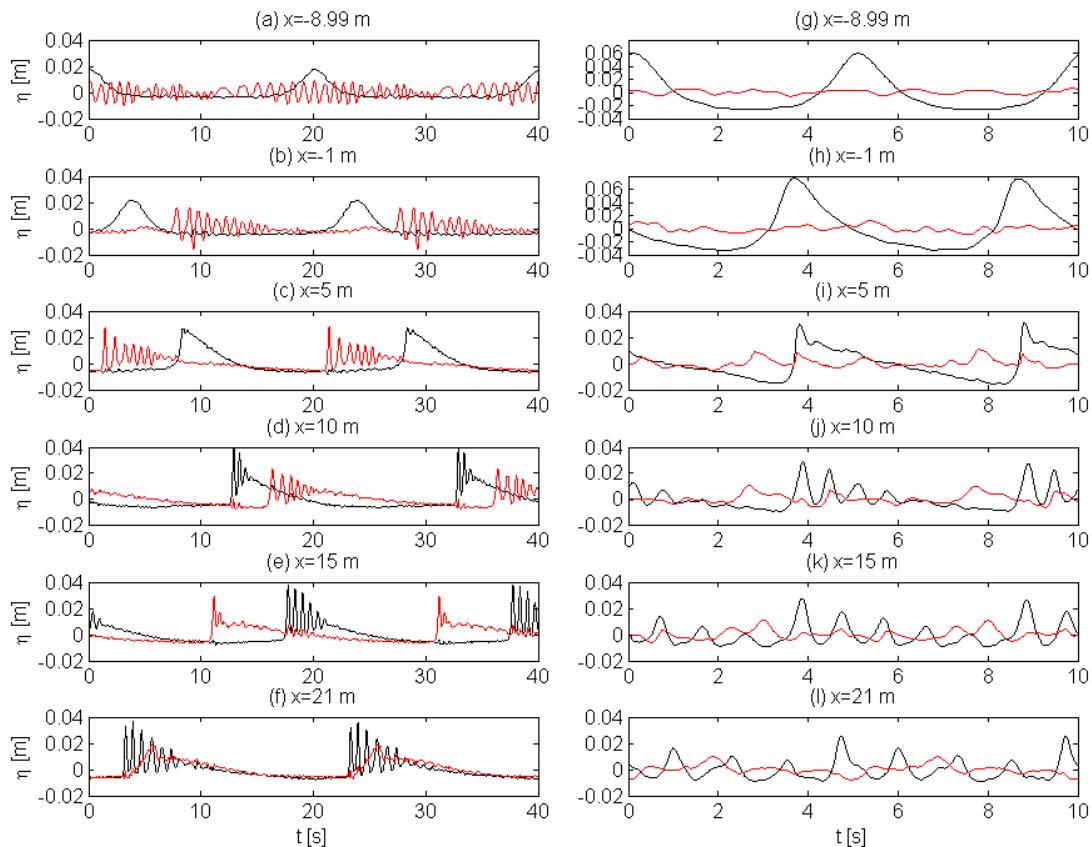
Pour les cas de type infragravitaire les moins énergétiques (R3 et R5) les vagues ne se raidissent pas ou très peu sur la face externe du récif (figure 2b). Elles se raidissent progressivement sur la plate-forme du récif (figure 2c) et forment un ressaut ondulé (figure 2d) dont les ondulations croissent rapidement sur le récif, à la fois en terme de hauteur et de période (figure 2d-f).

L'onde réfléchie ne comporte dans un premier temps plus aucune ondulations (cf. figure 2f). Elle va ensuite subir les mêmes transformations que l'onde incidente sur la plateforme du récif et former un ressaut ondulé. Ce ressaut ondulé est bien développé quand il arrive dans la partie la plus externe du récif (figure 2c), et va finir de se désintégrer en vagues courtes quand il se propage dans des profondeurs d'eau croissantes. Ces transformations sont responsables des oscillations haute fréquence mesurées à proximité du batteur (en rouge figure 2a). Dans les cas R2 et R6, le comportement est similaire, mais la première ondulation déferle sur une partie du récif.

#### 3.2 Modifications globales du spectre de vague

La figure 3 montre le spectre en amplitude à différentes positions le long du canal pour la partie incidente du signal pour le cas infragravitaire R5 (mêmes positions que figure 2). A la position la plus au large (figure 3a), le spectre incident est celui d'une onde cnoïdale, avec non seulement un pic à  $f=0.05$  Hz correspondant à la période des vagues incidentes, mais aussi des harmoniques assez marqués. Le développement des ondulations s'accompagne du développement d'un pic secondaire aux alentours de 1.5-

2 Hz (figure 3d), c'est-à-dire 30 à 40 fois la fréquence pic au large. Ce pic secondaire gagne en amplitude et se déplace vers les fréquences les plus basses quand le ressaut ondule se développe (figure 3d-f), ce qui est cohérent avec les modifications de la surface libre observées figure 2d-f.



*Figure 2. Séries temporelles de l'élévation de la surface libre pour : (a-f) cas R5 ( $H=2$  cm,  $T=20$  s) et (g-l) cas R2 ( $H=8$  cm,  $T=5$  s) à différentes positions le long du canal, du large (haut de la figure,  $x=-9$  m) au pied de la plage (bas de la figure,  $x=21$  m). La composante incidente du signal est en noir, la composante réfléchie en rouge.*

## Thème 1 – Hydrodynamique côtière

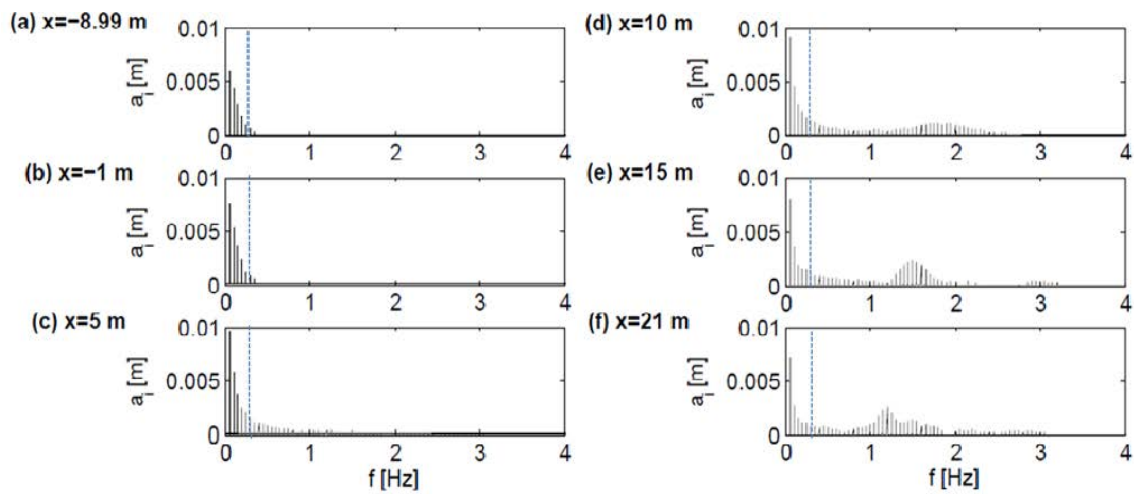


Figure 3. Spectres d'amplitude pour la composante incidente du signal de surface libre pour cas R5 ( $H=2$  cm,  $T=20$  s) à différentes positions le long du canal, du large (a) au pied de la plage (f). La ligne verticale en pointilles indique  $f_{cut}=0.22$  Hz (i.e.  $f_{cut,prototype} = 0.05$  Hz).

Pour quantifier les changements globaux du spectre incident sur la plate-forme du récif pour les 6 conditions de vagues, la hauteur significative  $H_{m0}$  et la période spectrale moyenne  $T_{m01}$  au niveau de la première sonde déployée sur le récif ( $x=3.75$  m) sont comparées aux caractéristiques calculées au pied de la plage ( $x=21$  m).  $H_{m0}$  décroît en moyenne de 33% lorsque les vagues se propagent sur récif. Cette décroissance est légèrement plus forte pour les cas où la hauteur de vagues au large était la plus importante (R1, R2, R4 et R6), et s'explique au moins en partie par une continuation du déferlement au-delà de  $x=3.75$ m. S'ajoute à cela une dissipation due à la friction des vagues sur le fond et les murs du canal, qui reste encore à être quantifiée. Plus marquantes sont les modifications de la période spectrale moyenne.  $T_{m01}$  est divisée par 3.8 en moyenne entre  $x=3.75$ m et  $x=21$  m (voir détails Tableau 2). Cette diminution s'explique principalement par le développement des ondulations, même si le raidissement de l'onde primaire sur le récif est lui aussi associé à un transfert d'énergie vers les premiers harmoniques (figure 3a-c par exemple) et contribue donc également aux changements de  $T_{m01}$ .

Tableau 2. Modifications de  $T_{m01}$  sur le récif (calculée pour le signal incident).

	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
$T_{m01,x=3.75}/T_{m01,x=21}$	2.3	2.3	5.9	4.3	6.7	1.3

### 3.3 Développement des ressauts ondulés et transferts d'énergie

En conditions naturelles, les ondes infragravitaires sont souvent séparées des vagues courtes à l'aide d'une fréquence de coupure relativement arbitraire  $f_{cut}$  de l'ordre de 0.04 – 0.05 Hz, ou alternativement par une fréquence de coupure qui dépend de la période pic des vagues courtes au large (ROELVINK et STIVE, 1989). Dans les deux cas, l'énergie qui serait transférée à des fréquences  $f > f_{cut}$  par la formation des ondulations mènerait donc à une perte d'énergie infragravitaire suivant ces définitions. Dans cette section nous nous focalisons sur les cas réguliers de type infragravitaire (R3-R6) et tentons de quantifier ces effets. Pour simplifier notre analyse, nous définissons une fréquence de coupure  $f_{cut} = 0.22$  Hz fixe pour les 4 cas considérés, qui correspond au 0.05 Hz communément utilisé en conditions réelles, et calculons la variance contenue dans les basses ( $f < f_{cut}$ ) et les hautes fréquences ( $f > f_{cut}$ ).

La Figure 4 montre la répartition de la variance des vagues incidentes entre les hautes et basses fréquences en fonction de la position pour les cas R3 à R6. Au large ( $x = -9$  m), la majeure partie de la variance se trouve dans les basses fréquences (>90%). Dans tous les cas, la proportion de la variance contenue dans les hautes fréquences augmente quand l'onde incidente se propage vers la plage, pour atteindre des valeurs variant entre 20% et 80% à  $x = 21$  m (56.4% en moyenne pour les 4 cas). Cette variabilité est liée à la vitesse à laquelle l'onde se transforme en ressaut ondulé, les cas ayant le plus d'énergie dans les hautes fréquences correspondant aux cas dans lesquels les ondulations ont eu le plus de temps pour se développer. Cas R6 (figure 4d), pour lequel la quantité d'énergie dans les hautes fréquences croît très lentement, est par exemple un cas pour lequel le front d'onde déferle avant de commencer à onduler.

Les conséquences de la formation des ondulations en terme de réflexion sur la plage sont finalement analysées figure 5. Cette figure montre que le coefficient de réflexion  $R^2$  sur la partie interne du récif (défini comme le rapport entre variance réfléchie sur variance incidente  $m_{0r}/m_{0i}$  à  $x = 21$  m) est fortement corrélé avec la répartition d'énergie entre hautes et basses fréquences. Les cas où les ressauts ondulés sont les plus développés sont donc aussi les cas où la réflexion est sur la plage est la plus faible. Cela s'explique par le fait que les hautes fréquences (et donc les ondulations) sont pratiquement entièrement dissipées sur la plage (pour  $f > f_{cut}$ ,  $R^2 \approx 0.2$  en moyenne pour les 4 cas), alors que la composante basse fréquence ne semble pas perdre d'énergie sur la plage ( $R_{BF}^2 \approx 1.2$  pour  $f < f_{cut}$ , voir aussi composantes incidentes et réfléchies figure 2f).

# Thème 1 – Hydrodynamique côtière

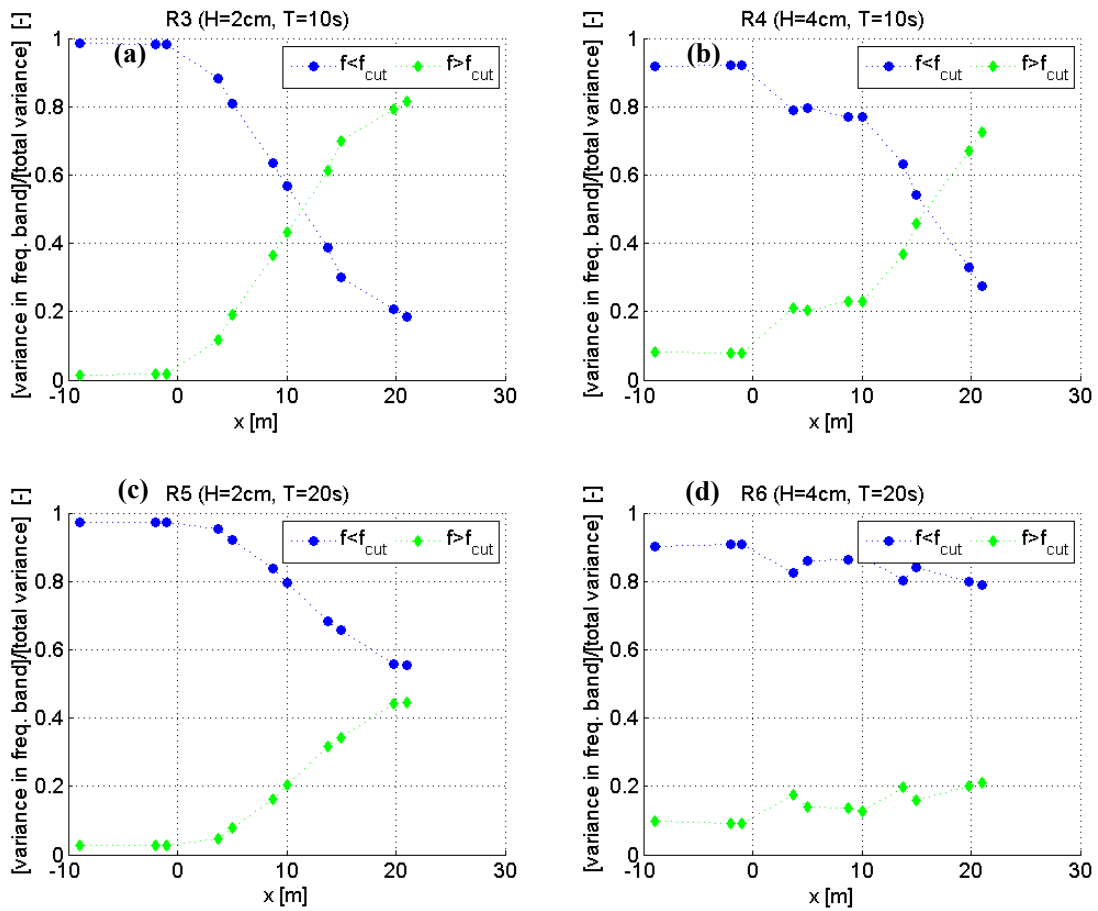


Figure 4. Distribution de la variance des vagues incidentes entre les basses (en bleu,  $f < f_{cut}$ ) et les hautes fréquences (en vert,  $f > f_{cut}$ ) pour les cas de type infragravitaire R3 (a) à R6 (d). La variance dans chaque bande est normalisée par la variance totale de l'onde incidente à la position considérée, et est donc toujours  $\leq 1$ .

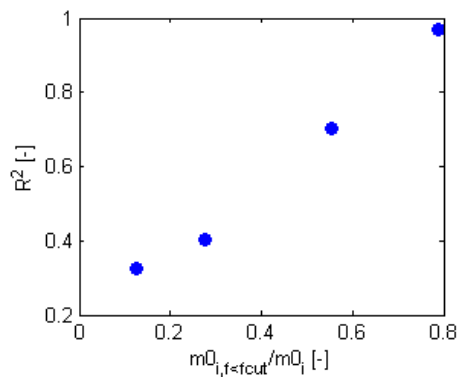


Figure 5. Coefficient de réflexion  $R^2$  en fonction de la proportion de la variance de l'onde incidente contenue dans les basses fréquences à  $x=21$  m pour cas R3-R6.



#### **4. Conclusions**

A partir d'expériences de laboratoire sur des vagues régulières, nous avons montré que les ondes infragravitaires étaient susceptibles de se transformer en ressaut ondulé lorsqu'elles se propagent sur un récif frangeant. Le développement des ondulations est associé à une redistribution de l'énergie des basses vers les hautes fréquences, qui peut atteindre 80% de l'énergie totale. La formation d'ondulations pourrait donc être un mécanisme efficace de transfert d'énergie de la bande infragravitaire vers celle des vagues courtes dans des cas réels. La prochaine étape est de caractériser l'impact de ces transformations sur les mouvements de la ligne d'eau. L'analyse préliminaire des données montre une signature claire des ondulations dans le *run-up*, mais celle-ci doit être quantifiée plus en détail. Le jeu de données pourra ensuite être étendu à l'aide de modélisation numérique de façon à déterminer les conditions d'occurrence des ressauts ondulés dans des conditions plus réalistes et caractériser leurs effets en termes de transferts d'énergie et mouvements de la ligne d'eau.

#### **5. Références bibliographiques**

- CHERITON O., STORLAZZI C.D., ROSENBERG K.J. (2016). *Observations of wave transformation over a fringing coral reef and the importance of low- frequency waves and offshore water levels to runup, overwash, and coastal flooding*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 121, pp 1–20. <https://doi.org/10.1002/2015JC011231>
- DEKKERS J. (2018). *Undular bore development over coral reefs*. MSc thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- GALLAGHER B. (1972). *Some qualitative aspects of nonlinear wave radiation in a surf zone*. Geophysical Fluid Dynamics, Vol. 3(1), pp 347–354. <https://doi.org/10.1080/03091927208236086>
- GUZA R.T., THORNTON E.B., HOLMAN R.A. (1984). *Swash on steep and shallow beaches*. Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conf. on Coastal Eng., pp 708-723
- NWOGU O., DEMIRBILEK Z. (2010). *Infragravity wave motions and runup over shallow fringing reefs*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 136, 295-305. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000050)
- PEREGRINE D.H. (1966). *Calculations of the development of an undular bore*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 25, pp 321-330. <https://doi.org/10.1017/S0022112066001678>
- ROELVINK J.A., STIVE M. (1989). *Bar-generating cross-flow mechanisms on a beach*. Journal of Geophysical research: Ocean, Vol. 94, pp 4785-4800. <https://doi.org/10.1017/S0022112066001678>
- WHITE I., FALKLAND A.C., PEREZ P., DRAY A., METUTERA T., METAI E., OVERMARS M. (2007). *Challenges in freshwater management in low coral atolls*, Journal of Cleaner Production, Vol. 15(16), pp 1522-1528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.051>

*Thème 1 – Hydrodynamique côtière*