

**ACADÉMIE
DE NANCY-METZ**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Préservation du littoral côtier à la suite des dérèglements climatiques



Élèves du lycée Henri Poincaré participant à ce projet :

Perisset-Cambon Loïse

Litaize Justine

Carnis Adèle

Bernard Salomé

Olmos Paco

Professeurs encadrants : Mr Rachid Zaid / Mme Estelle Parisi

Remerciements

A Monsieur Nicolas Rimbert enseignant-chercheur au Lemta et directeur-adjoint du Groupe de recherche "Transferts et Interfaces" [GDR CNRS TRANSINTER] d'avoir pris sur son temps pour nous expliquer et pour mettre à notre niveau des notions extrêmement difficiles, pour nous avoir fait visiter son laboratoire et pour avoir répondu à nos interrogations concernant notre projet.

Merci au LEMTA | Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique et Appliquée de nous avoir ouvert ses portes et d'avoir eu la gentillesse de nous mettre à l'honneur sur leur site LinkedIn

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7122198528898002944/>

https://twitter.com/Labo_Lemta/status/1716447414985294059

A Monsieur Ben-Zineb Tarak enseignant-chercheur, directeur-adjoint de Polytech Nancy et directeur du département Énergie, Mécanique, Matériaux et Environnement (EMME) Polytech Nancy, d'avoir toujours répondu présent à chacune de nos sollicitations.

Aux nombreux camarades qui se sont impliqués dans notre projet alors même qu'ils ne faisaient pas partie du groupe inscrit au concours faute de places.



(Source : <https://www.encyclopedie-environnement.org/app/uploads/2021/04/vagues-houles.jpg>)

Sommaire

1. <i>Changements climatiques</i>	p 4
2. <i>Les terres sont-elles importantes pour nous ?</i>	p 6
3. <i>Conséquences des changements climatiques</i>	p 6
4. <i>Comment lutter contre le phénomène d'immersion</i>	p 7
4.1. <i>Comprendre le principe de la houle</i>	p 8
4.1.1. <i>De la vague à la houle</i>	p 8
4.1.2. <i>Le déferlement de la houle</i>	p 11
4.1.3. <i>Dissipation de l'énergie cinétique</i>	p 12
4.2. <i>Les solutions d'aménagements pour atténuer la cinétique de l'immersion</i>	p 13
4.2.1. <i>Critiques des infrastructures proposées</i>	p 15
4.2.1.1. <i>Conséquences sur la morphologie du milieu</i>	p 15
4.2.1.2. <i>Infiltration de la digue</i>	p 16
4.2.1.3. <i>Effet renard</i>	p 16
5. <i>Vérification expérimentale de l'efficacité des solutions d'aménagements Proposées</i>	p 16
5.1. <i>Conception du matériel expérimental</i>	p 16
5.2. <i>Analyse statistique du mouvement de l'eau dans la cuve à vagues</i>	p 17
5.3. <i>Etude expérimentale</i>	p 18
5.3.1. <i>Comparaison entre utilisation / non utilisation d'une digue</i>	p 18
5.3.2. <i>Comparaison entre utilisation / non utilisation d'un perré sur grande plage</i>	p 18
5.3.3. <i>Efficacité d'une digue sous-marine</i>	p 19
5.3.4. <i>Efficacité d'une digue rocailleuse</i>	p 19
5.3.5. <i>Un aperçu du tableau de mesures et de quelques graphiques</i>	p 20
5.4. <i>Critique du modèle expérimental</i>	p 21
6. <i>Conclusion</i>	p 21
7. <i>Ouverture</i>	p 22
8. <i>Epilogue</i>	p 24
<i>Référence Bibliographiques</i>	p 25

1. Changements climatiques

En 2009, une équipe internationale de chercheurs ont défini le concept de « limites planétaires », adopté ensuite par l'organisation des nations unies.

La question à laquelle il fallait répondre : « jusqu'à quelles limites notre environnement pourra absorber les pressions anthropiques (d'origine humaine) sans compromettre les conditions de vie de l'espèce humaine sur terre ? », en effet trouver une méthode d'évaluations et de suivi des changements climatiques provoqués par l'homme qui sont susceptibles de menacer la stabilité des écosystèmes est devenue une priorité.

Cette approche scientifique consiste, à fixer les seuils que l'humanité ne devrait pas transgresser afin de préserver la stabilité des écosystèmes et de maintenir des conditions favorables à la vie sur terre.

Neuf domaines planétaires ont été définies, dont six sont d'ores et déjà dépassées (à cause de l'acidification des océans, de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, de l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère) :

- Le changement climatique
- L'érosion de la biodiversité
- La perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore
- Le changement d'usage des sols
- L'utilisation de l'eau douce
- L'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère

Concernant les trois derniers domaines, même si les seuils critiques n'ont pas encore été atteints, les indicateurs montrent que des processus de dégradation sont en cours.

Le dépassement d'un seuil critique ne se traduit pas forcément par un basculement brutal et soudain ; le mécanisme d'irréversibilité s'enclenche tout de même et conduit à des phénomènes d'emballement et d'aggravation comme on peut l'observer ici ou là suite à ce dérèglement climatique.

Le dérèglement climatique correspond à une perturbation, à long terme, de l'équilibre météorologique à l'échelle planétaire. Il se caractérise par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et par une modification des écosystèmes et des grands cycles biogéochimiques de la planète.

L'effet de serre est un phénomène naturel nécessaire à la vie sur terre et qui se déroule au niveau de l'atmosphère. Une partie de l'énergie apportée par les rayons du Soleil est absorbée par la terre, qui la réchauffent et lui permettent, à son tour, d'émettre des rayonnements infrarouges. Les Gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère ont la propriété de se réchauffer et de réémettre des rayonnements infrarouges en direction de la terre, ce qui la réchauffe encore un peu plus. Sans cet effet de serre, la température moyenne de l'air passerait de +15°C à -18°C en permanence, en fonction de la présence ou non des rayons solaires. L'effet de serre est donc une nécessité absolue, indispensable à la vie sur terre. (figure 1)

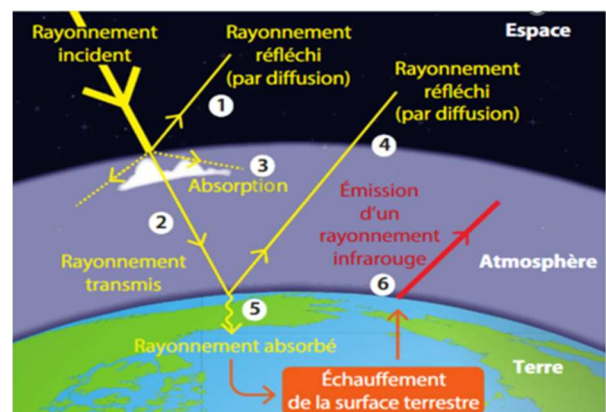


Figure 1 Echauffement de la surface de la Terre
(Source : Spécimen Hatier « enseignement scientifique »)

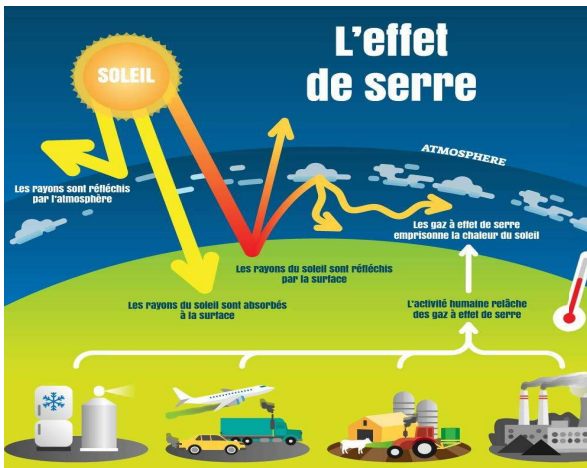


Figure 2 Effet de Serre (Source : [Les gaz à effet de serre - Ecologie et environnement- teteamodeler.ouest-france.fr](http://Lesgazàeffetdeserre-ecologieetenvironnement-teteamodeler.ouest-france.fr))

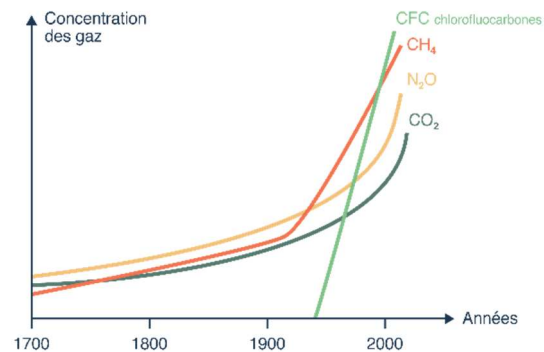


Figure 3

Comment le changement climatique est-il provoqué ?

Depuis la révolution industrielle, l'espèce humaine modifie sans cesse les échanges de gaz à effet de serre (GES) principalement du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O), provoquant ainsi un déséquilibre météorologique et un changement climatique (figure 3).

Selon le GIEC (Groupe International d'Experts sur le Climat), ce dérèglement climatique a démarré il y a un peu plus de 150 ans, avec la révolution industrielle. Il est d'origine anthropique et résulte principalement de l'accumulation de gaz à effet de serre d'origine humaine dans l'atmosphère (les figures 2 et 3 permettent de comprendre ce principe). Il constitue, sans action efficace pour le limiter, un risque élevé de voir se produire une série de conséquences climatiques majeures et irréversibles dans le monde.

En effet au fil des décennies, ce phénomène a entraîné une hausse significative des températures moyennes à l'échelle mondiale (le GIEC constate que la hausse de la température globale s'est encore accentuée, à un rythme qui fera très probablement dépasser le seuil de $1,5^\circ\text{C}$ de réchauffement depuis l'ère préindustrielle à 2021 - 2040).

(Source : le deuxième volume de son sixième rapport d'évaluation sur le climat du GIEC)

Ce réchauffement sera à l'origine de l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes avec une implication profonde pour les zones côtières, particulièrement vulnérables aux élévations du niveau de la mer. [1]

Il est donc urgent d'agir collectivement pour atténuer les conséquences de ces changements à venir ; l'éducation a un rôle clé à jouer pour que les gens disposent des connaissances et des compétences nécessaires relatives à ce qui nous attend afin d'agir et d'être préparés à vivre dans un monde en mutation.

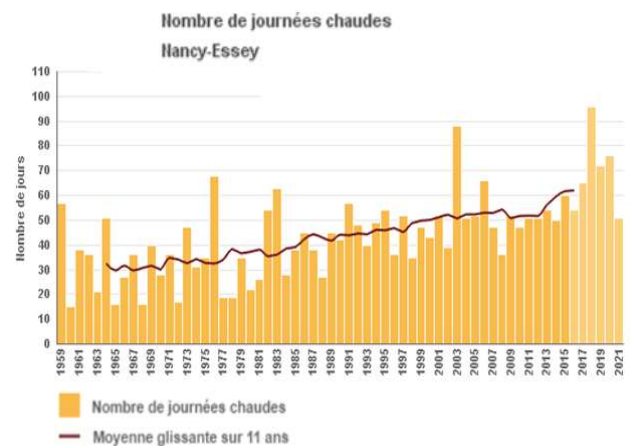


Figure 4 Exemple de la région de Nancy

L'objectif premier de ce travail est de sensibiliser les jeunes générations d'aujourd'hui et de demain et particulièrement les élèves de notre lycée au changement climatique en utilisant des pédagogies actives pour mieux aider à comprendre ce phénomène (figure 5).



Figure 5 : séance de sensibilisation au lycée Henri Poincaré à Nancy pendant une séance conjointe PC-SVT : utilisation de la fresque du climat

2. Les terres sont-elles importantes pour nous ?

Reconnaître que l'espèce humaine est responsable du changement climatique est une première étape dans la compréhension de ce phénomène. L'étape suivante consiste à prendre conscience de la nécessité de protéger les terres de l'impact du changement climatique.

Toutes les sociétés profitent des ressources naturelles de la terre pour produire des objets nécessaires dans tous les domaines de la vie quotidienne (habitation, vêtements, médicaments, jeux et art, nourriture et boissons, etc.).

Aussi, protéger cette ressource naturelle devient une nécessité absolue pour l'espèce humaine : c'est cet aspect que nous allons aborder au cours de cette étude

3. Conséquences des changements climatiques.

L'une des conséquences les plus visibles des changements climatiques selon le GIEC est l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes le long des côtes, générant des vagues dévastatrices et des houles marines. Ces phénomènes météorologiques extrêmes peuvent entraîner des inondations côtières, des dégâts matériels importants, des conséquences économiques considérables et modifier la dynamique des côtes [2]



Figure 6 Tempête Eléonor (2008) à Saint-Malo

Les populations vivant dans ces zones sont confrontées à des menaces accrues pour leur sécurité et leur bien-être. La montée du niveau de la mer menace de submerger des zones densément peuplées, tandis que l'érosion littoral dégrade les plages et les côtes, impactant les activités économiques et la biodiversité [3].

Ces menaces sont plus prononcées dans certaines régions du monde [3], on peut citer par exemple :

- l'Asie du Sud-Est, qui abrite de nombreuses métropoles côtières densément peuplées, notamment Bangkok, Jakarta et Manille. Ces villes sont exposées aux risques d'inondations côtières dues à la combinaison de l'élévation du niveau de la mer et de l'urbanisation rapide.
- le Bangladesh, avec sa topographie plate et ses zones densément peuplées, est l'un des pays les plus vulnérables à l'élévation du niveau de la mer et aux tempêtes cycloniques.
- les Maldives, un archipel situé dans l'océan Indien, est menacé de submersion en raison de l'élévation du niveau de la mer. Cette nation insulaire est l'un des exemples les plus emblématiques des impacts des changements climatiques sur les zones côtières.
- les Pays-Bas, bien que réputés pour leur expertise en gestion de l'eau, sont également confrontés à des défis croissants en matière d'inondations côtières. Une grande partie du pays est située en dessous du niveau de la mer, ce qui rend essentielle la protection côtière.



Figure 7 submersion marine en Asie

Ces régions, et d'autres, font face à des défis considérables pour protéger leurs populations, leurs infrastructures et leurs ressources naturelles des conséquences des changements climatiques.

De même, pour accentuer l'alerte sur cette problématique, le rapport du **GIEC** (28 février 2022) indique que dans le cas d'un réchauffement de 2 °C d'ici 2100, jusqu'à 18 % des espèces terrestres auront un risque élevé d'extinction. Si la Terre se réchauffe de 4 °C, une espèce sur deux actuellement connue des scientifiques sera menacée (source :

<https://www.lesechos.fr/monde/enjeux-internationaux/rapport-du-giec-6-chiffres-alarmants-sur-les-consequences-du-rechauffement-climatique-1390202>).

4. Comment lutter contre le phénomène d'immersion marine ?

Le littoral est devenu une zone fortement urbanisée concentrant une part importante de la population mondiale, c'est un espace de fort enjeu économique à l'image des nombreuses structures industrielles, énergétiques et commerciales qui s'y trouvent. Face à la puissance croissante des tempêtes couplée à la montée des eaux, repenser les aménagements côtiers pour protéger le littoral est devenu vitale selon le sixième rapport d'évaluations du GIEC intitulé « changements climatiques 2022 »

Pour répondre à cette problématique nous avons axé notre travail sur la combinaison entre la compréhension de la cause (la houle) et les procédés pour atténuer la cinétique de celle-ci afin de protéger le littoral.

4.1. Comprendre le principe de la houle

Le principe de la houle a été introduit par un article publié par SHF [20], dont voici un extrait :

« En Italie, le premier qui ait entrevu, par son génie, le mécanisme réel de la houle marine fut Léonard de Vinci. Dans son livre d'or : « Du mouvement et de la mesure de l'eau », par d'heureuses images agrestes, il a le premier affirmé que, dans les ondes d'oscillation du large soulevées par les vents marins, il n'y a pas de translation de masses mais seulement propagation de mouvement. Voici d'ailleurs comment il s'exprime : « Il arrive très souvent que la vague fuit le lieu de sa création, mais sans que l'eau change de place. Ne voit-on pas de même au mois de mai courir par les campagnes l'ondulation que fait le vent dans les blés, et pourtant les blés n'ont pas changé de place ». La nature oscillatoire de la houle du large est exprimée d'une autre façon par de Vinci quand il traduit ce phénomène par une autre image heureuse « plutôt tremblement que mouvement ». Et le livre d'or déjà cité contient de nombreuses considérations sur la houle, dans toutes ses manifestations depuis le large jusqu'à la côte. »

4.1.1. De la vague à la houle régulière

Les vagues sont produites par le vent selon des mécanismes complexes qui font encore l'objet de recherches et que l'on va essayer de décrire de façon sommaire avec nos connaissances de lycéens.

L'énergie mécanique d'une particule de fluide selon Bernoulli est la somme de :

(Source : Spécimen Hatier de physique-chimie terminale spécialité [10])

- L'énergie cinétique : [10]

Une particule de fluide de masse volumique ρ et de volume V possède une masse $m = \rho.V$ et une énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} .m.v^2$ lorsqu'elle est en mouvement avec une vitesse v .

$$E_c = \frac{1}{2} .m.v^2 = \frac{1}{2} .\rho.V.v^2 = V.e_c \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} V : \text{Volume de la particule du fluide} \\ v : \text{vitesse de la particule du fluide} \\ e_c = \frac{1}{2} .\rho.v^2 : \text{énergie cinétique} \\ \text{volumique exprimée en } J.m^{-3} \end{array}$$

- L'énergie potentielle [10]

$$E_{pp} = p.z = m.g.z = V.p.g.z \\ = V.e_{pp} \quad \begin{array}{l} z : \text{Hauteur de la particule de fluide (m)} \\ m : \text{masse du fluide (kg)} \\ p : \text{Poids de la particule (N)} \\ g : \text{Champ de pesanteur terrestre (m.s}^{-2}\text{)} \\ \rho : \text{Masse volumique de la particule de fluide (kg.m}^{-3}\text{)} \\ V : \text{Volume de la particule du fluide (m}^3\text{)} \\ e_{pp} = \rho.g.z : \text{énergie potentielle volumique en } J.m^{-3}. \end{array}$$

- Les Contraintes (Pression) [10]

Sur sa surface, la particule subit des contraintes :

✓ La contrainte perpendiculaire à la surface S où elle s'exerce est :

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} \times \mathbf{S} \quad \text{Avec} \quad \begin{array}{l} P : \text{pression (1 Pa = 1 J.m}^{-3}\text{)} \\ F : \text{force pressante (N)} \\ S : \text{aire de la surface sur laquelle cette pression s'exerce (m}^2\text{)}. \end{array}$$

- ✓ La contrainte tangentielle à la surface S appelée contrainte de cisaillement (lié à la viscosité) :

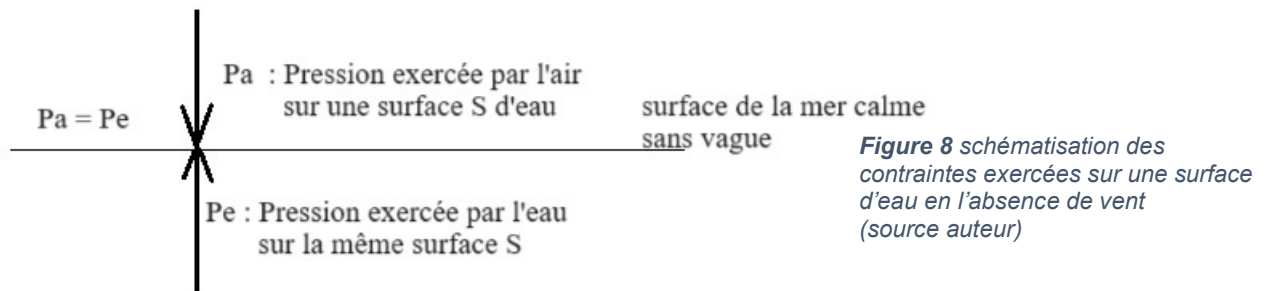
$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \times \mathbf{S} \quad \text{Avec} \quad \tau : \text{cisaillement (1 Pa = 1 J.m}^{-3}\text{)}$$

$S : \text{aire de la surface sur laquelle cette contrainte s'exerce (m}^2\text{)}.$

Pour un écoulement permanent d'un fluide parfait et incompressible, de masse volumique ρ le long d'une même ligne de courant, la relation de Bernoulli donne pour la conservation de l'énergie mécanique :

$$\text{Constante} = P + \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z \quad (\text{J.m}^{-3}) \quad [10]$$

- ✓ En l'absence de vent, cette relation appliquée à la surface S de l'eau peut s'écrire :



$$\text{Constante} = P_a + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_a^2 + \rho \cdot g \cdot z_a = P_e + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_e^2 + \rho \cdot g \cdot z_e$$

P_a : pression de l'air sur la surface S de l'eau P_e : pression de l'eau sur la même surface S

v_a : vitesse du vent z_a : hauteur de l'air v_e : vitesse de l'eau z_e : hauteur de l'eau

$$P_a = P_e + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_e^2 - v_a^2)$$

Avec $\rho \cdot g \cdot (z_e - z_a) = 0$ pour un écoulement horizontal

- ✓ Lorsqu'il y a du vent, la relation de Bernoulli appliquée à la surface S s'écrit :



Figure 9 étape de la formation d'une vague Source auteur

En présence de vent, la vitesse v_a du vent augmente on a :

$v_a > v_e$ et donc $P_a < P_e$ ce qui permet de soulever la surface S d'eau formant ainsi la première vague

En conclusion :

L'augmentation de la vitesse du vent a pour conséquence de faire diminuer la pression P_a exercée par les molécules d'air sur une surface S de l'eau (relation de Bernoulli et de venturi [10]). Comme la pression P_e exercée par les molécules d'eau sur la même surface S n'est plus compensée par la pression P_a alors il y a élévation de l'eau créant une perturbation et donc une vague (figures 9 et 10).

Comment la vague se forme :

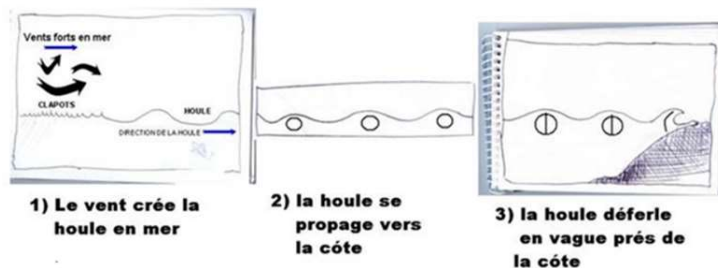


Figure 10 Étape de la formation d'une vague à la formation de la houle (source : <https://surfalachambre.files.wordpress.com/2013/03/forme-1.jpg?w=600&h=319>)

Les vagues sont ainsi générées à partir de vents soufflant à la surface de la mer au-dessus de hauts-fonds. La vitesse de la couche d'air, plus rapide, entraîne la couche d'eau du dessous en transférant son énergie cinétique, créant le mouvement des particules d'eau de surface [11]. La couche en surface entraîne à son tour celle du dessous créant ainsi un mouvement allant du fond à la surface (figure 11) sur une large étendue appelée la zone fetch.

Le fetch (terme anglais signifiant « une étendue » : zone en mer au-dessus de laquelle souffle le vent sans rencontrer d'obstacle) est la zone d'élan permettant au vent de lever une mer, plus le fetch est important plus la hauteur des vagues sera grande.

C'est un phénomène d'écoulement sur les "rugosités" que sont les vagues qui crée des dépressions aux sommets et des suppressions aux creux, ayant pour effet d'amplifier des vaguelettes initiales pour former un régime complexe de vagues de plus en plus longues et puissantes au fur et à mesure de leur propagation (figure 11).

Selon la théorie d'Airy, les particules d'eau voisines de la surface sont mises en mouvement et reviennent pratiquement à leur position initiale. Elles forment ainsi des orbites circulaires dont le diamètre est égal à la hauteur de la vague. Ce mouvement circulaire se poursuit sous la surface et diminue très rapidement avec l'augmentation de la profondeur (figure 12). Il n'y a pas de transfert horizontal de matière.

Lorsqu'elles s'éloignent de leur zone de génération, les vagues se régularisent et on parle alors plutôt de houle. Cette houle peut être décrite, pour simplifier notre étude, comme une superposition d'ondes sinusoïdales élémentaires qui se prêtent bien à l'analyse mathématique (modèle d'Airy).

La houle se propage ensuite grâce à la gravité, qui crée une variation de pression autour de la surface libre de la vague, ce qui amplifie son mouvement de propagation [12]. Ce modèle bien que pratique pour comprendre le fonctionnement de la houle nécessite tout de même quelques précautions. En effet dans la réalité, les vagues ne forment pas une onde régulière. De nombreux trains de vagues, de fréquence, de hauteur et de vitesses différentes peuvent se propager sur la mer.

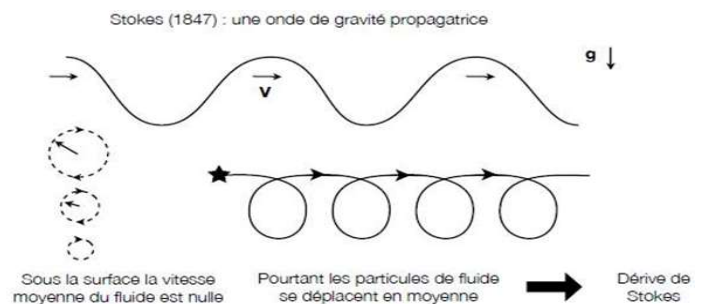


Figure 11 : propagation des vaguelettes (Source : science et vie junior)

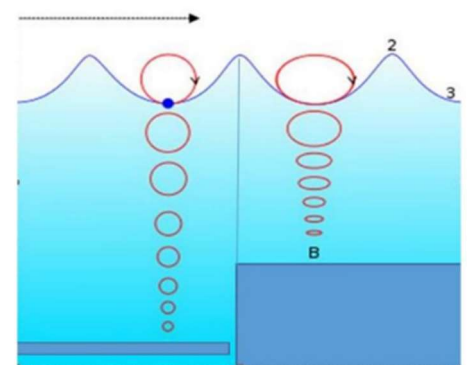


Figure 12 déplacement de la perturbation (Source : Science et vie junior)

4.1.2. Le déferlement de la houle

Pour illustrer nos propos prenons l'exemple des marais de Brouage, qui font partis des marais de Moëze situés en Charente-Maritime près de l'île d'Oléron et qui font face à d'importants problèmes d'érosion et de recul du trait de côte.

La houle prend naissance loin des côtes, dans un vaste étendu d'eau, l'océan Atlantique : zone de fetch, où le vent peut souffler sans rencontrer d'obstacles.

Lorsque la houle se rapproche des marais de Moëze et donc des côtes, la profondeur de l'eau diminue (elle passe de 4700m de profondeur à 500km des côtes à 40m à 40km du marais de Brouage), les orbites circulaires des particules d'eau s'écrasent et deviennent elliptiques (figure 13) au contact du fond et perdent ainsi de l'énergie cinétique :

En eau peu profonde (lorsque la profondeur de l'eau est inférieure à un dixième de la longueur d'onde), on a :

$$C = \sqrt{g \times h}$$

Avec h : profondeur de l'eau en m.
 $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

Comme son énergie mécanique est conservée et qu'avec le frottement des particules sur le fond, la vitesse et la longueur d'onde cette-fois-ci, diminuent de même que l'énergie cinétique. Cette dernière ne s'annule pas, mais elle se transforme en énergie potentielle, ce qui augmente l'amplitude de la vague. En s'approchant de la surface, la partie inférieure de la vague est ralentie avant la partie supérieure ; l'inclinaison de la crête de la vague devenue instable se rompt, formant ainsi un déferlement. Les forces gravitationnelles, le frottement et la différence de vitesse entre la partie supérieure et inférieure de la vague contribuent à ce processus (figure 14) [13].

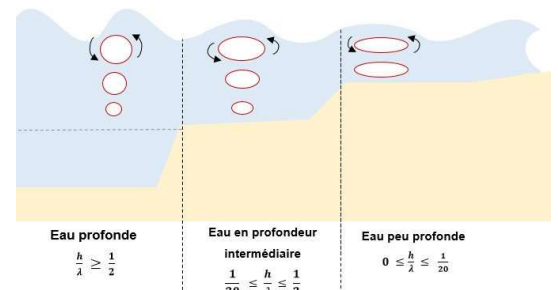


Figure 13 les orbites circulaires s'écrasent (source: <https://mastercours.ma/2019/02/10/domaines-detude-de-la-houle/>)

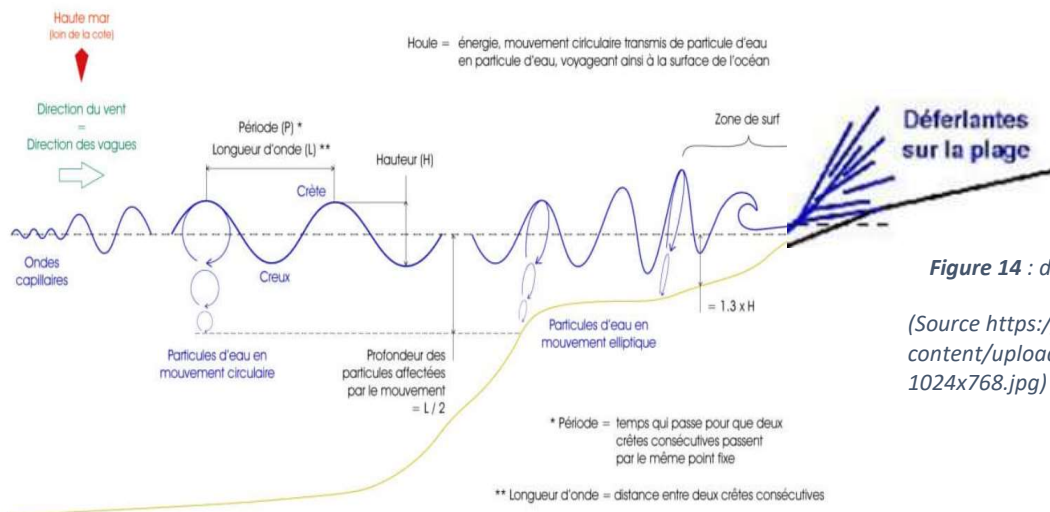


Figure 14 : déferlement de la vague

(Source <https://nalusouls.com/wp-content/uploads/2019/07/Origine-des-vagues-1024x768.jpg>)

Lorsque la crête se rompt, une lame d'eau se forme à l'avant de la vague de la vague déferlante. Cette lame d'eau transporte une grande quantité d'énergie cinétique et se déplace rapidement vers l'avant.

L'énergie cinétique de la vague est libérée sous forme de mouvements chaotiques, de tourbillons et de mousse.

4.1.3. Dissipation de l'énergie cinétique

Au fur et à mesure que la vague déferle, l'énergie cinétique de la vague est dissipée par le frottement avec le fond marin et la turbulence de l'eau. La hauteur de la vague diminue progressivement et elle se transforme en une série de vagues plus petites et moins puissantes.

Il est important de noter que le processus de déferlement peut varier en fonction de facteurs tels que la géométrie de la côte, le type de fond marin, la taille et la forme de la vague, ainsi que les conditions météorologiques. Le déferlement des vagues peut varier du déferlement doux des vagues de plage aux déferlements puissants des vagues de récif ou de déferlantes océaniques plus massives



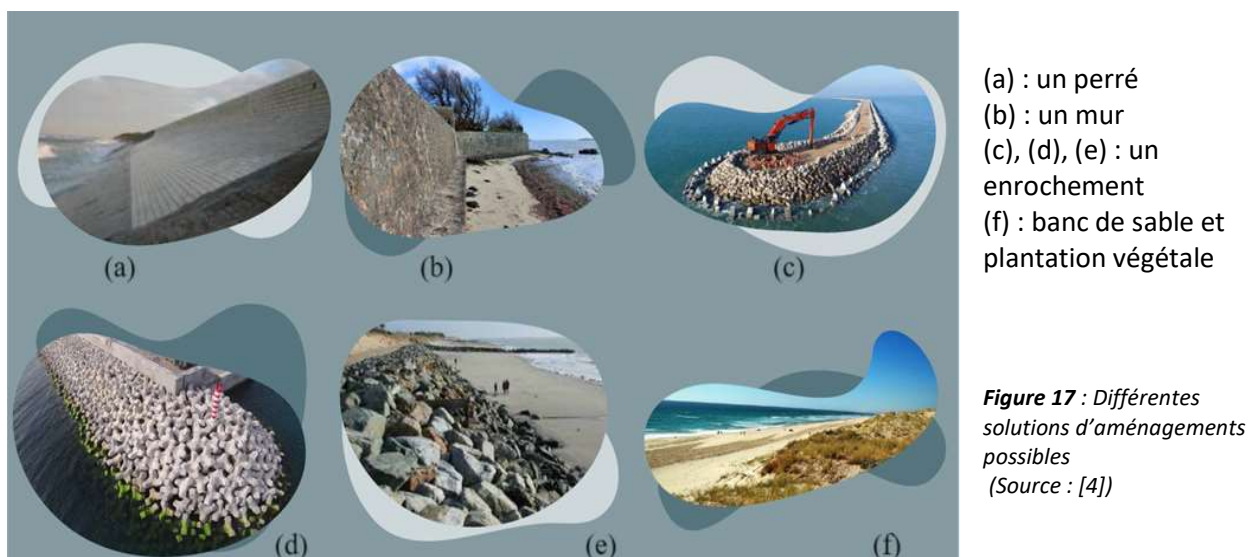
Figure 15 Déviation et raidissement de la houle à l'approche de la côte. [Source : Surf Nature Alliance – DR]



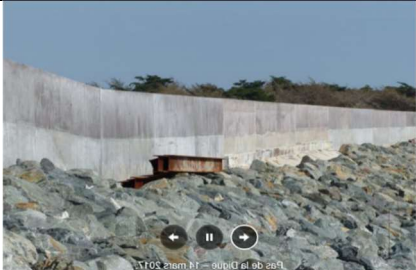

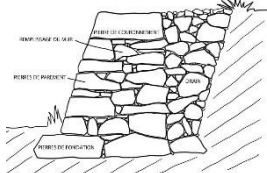
Figure 16 L'île d'Oléron

- A la rencontre d'une paroi ou d'une côte abrupte, la houle subit une **réflexion**, un exemple est donné au niveau du marais de Brouage.
- Dans le cas d'un cap, la houle peut alors changer sa direction de propagation par le phénomène de **diffraction**, (Figure 15), un exemple est illustré par l'approche de l'île d'Oléron (figure 16)
- La houle est déviée par un changement de profondeur, à cause du phénomène de **réfraction**. Ainsi à l'approche d'une plage, les lignes de crête ont tendance à suivre les lignes bathymétriques, comme on le voit sur la Figure 16. (*Bathymétrie est la mesure de la profondeur de l'eau dans les océans, les mers*)
- Elle sculpte le **rivage à long terme**, par l'érosion des côtes rocheuses et des plages, ainsi que par le dépôt de sédiments au gré des courants qu'elle induit.

4.2. Les solutions d'aménagements proposées pour atténuer la cinétique de L'immersion



Face à cette montée des risques liés aux changements climatiques, de nombreuses nations et communautés côtières ont adopté diverses mesures pour atténuer les impacts (figure 17) et réduire la puissance de la houle. Un ensemble de ces mesures sont décrites au sein du tableau ci-dessous.

Dispositif mis en place	Illustration
<p>Les murs sont placés en bord de mer, pour arrêter la propagation de la vague. Ces constructions peuvent être surmontées par des couronnements (figure 19) arrondis afin d'assurer un retour de l'eau dans la mer [5].</p>	 <p>Figure 18 mur côtier (Source : <u>Digue de Saint-Clément, mur et risberme – Chroniques ordinaires des petits moments de la vie rétaise (notre-ile-de-re.com)</u>)</p>  <p>Figure 19 mur avec couronnement arrondi (Source : <u>https://img-4.linternaute.com</u>)</p>
<p>Un perré</p>	

Un **perré** est un revêtement en pierre sèche ou en pierre liée au mortier que l'on aménage au pied ou sur le flanc d'un talus sujet à des glissements ou d'une tranchée susceptible d'être dégradée par les eaux.



Figure 20 un perré (Source : <https://www.deltafm.fr/info-locale/region/cote-dopale/elus-de-cote-dopale-reunis-renforcer-digues-eviter-catastrophe-demain>)

Les **enrochements** consistent à ajouter des pierres naturelles ou de béton en bout de plage, cela réduit la puissance de l'eau en créant des chocs, ainsi la vague perd peu à peu son énergie.



Figure 21 Un enrochement (source journal « la voix du Nord » 6 octobre 2018)

Les **digues : les épis ou brise-lames** : des ouvrages naturels ou artificiels conçus pour retenir l'eau ou pour s'opposer à son écoulement. Leur agencement varie en fonction de la zone géographique et de l'effet souhaité.



Figure 22 les épis : digues brise - lames (Source <https://www.pechefrontignan.com/wp-content/uploads/2018/06/epis-frontignan.png>)

Les **bancs de sable** (ouvrages naturels ou artificiels conçus pour retenir l'eau ou pour s'opposer à son écoulement).





Figure 23 banc de sable d'Arcachon (Source : <https://www.mylittleroad.com/wp-content/uploads/2015/07/banc-sable-arcachon-mylittleroad.jpg>)

Les **digues sous-marines** (de notre conception (Figure 24)).



Figure 24 digue sous-marine (notre contribution)

<p>Digues Mangroves : projet pégase (Figure 25)</p>	 <p>Figure 25 digue mangrove (source : https://www.neozone.org/blog/wp-content/uploads/2022/06/projet-seaboost-digue-pegase-001.jpg)</p>
<p>Riches en biodiversité, les mangroves constituent des écosystèmes spectaculaires qu'il faut protéger à tout prix. Situées aux frontières de la terre et de la mer, ces forêts amphibies constituées de palétuviers rouges : arbustes tropicaux pouvant atteindre 8 mètres de hauteur et possédant de longues racines qui s'enfoncent dans l'eau ou dans la vase. Elles permettent de protéger les zones côtières. Les digues mangroves sont utilisées sur la base de ce principe.</p>	 <p>Figure 26 mangrove (Source : https://www.pratique.fr/actu/qu-est-ce-que-la-mangrove-6658677.html)</p>

4.2.1. Critiques des infrastructures proposées

4.2.1.1. Conséquences sur la morphologie du milieu

L'installation de ces infrastructures présente certains aspects négatifs.

Les digues et perrés de béton peuvent causer des effets de réflexion, diffraction (figure 27) et shoaling (phénomène d'augmentation de l'amplitude des vagues et un ralentissement de la vitesse de propagation lors de l'approche de la côte) (figure 28) et ainsi changer le sens de circulation de l'eau [5,6, 7].

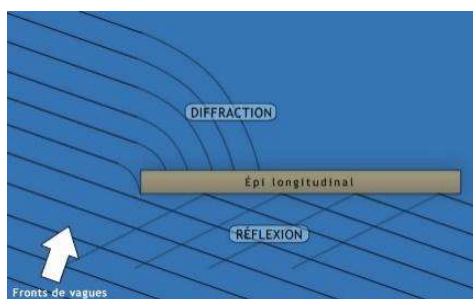


Figure 27 diffraction et interférence **figure 28** diffractions schématisation de la diffraction et la réflexion des vagues sur une digue

(Source figure 27 : https://sciencedecomptoir.cafe-sciences.org/wp-content/uploads/sites/12/2014/09/diff_reflex-768x463.jpg)

(source figure 28 : <https://e.educlever.com/img/6/0/1/7/601782.png>)

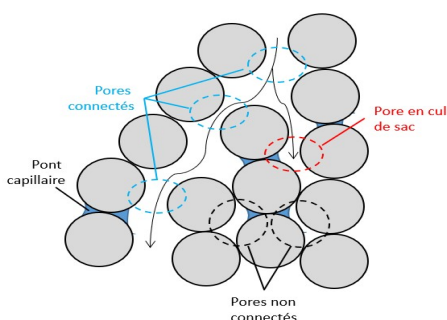
Ces effets peuvent entraîner des conséquences plus ou moins importantes en fonction de la morphologie du littoral (port, ville, etc..). Elles peuvent engendrer de nouveaux courants maritimes ou entraîner des phénomènes de sédimentation contribuant au recul du trait de côte. Elles nécessitent un entretien permanent, car l'eau de mer entraîne des effets de corrosion des bétons liés à son infiltration.

4.2.1.2. Infiltrations dans la digue

Un milieu poreux est un milieu composé de particules (sable) et de cavité appelées pores.

Les milieux poreux comme le béton permettent l'infiltration d'eau ce qui provoque des déformations de structures pouvant aller jusqu'à l'affaissement de l'installation.

Figure 29 (Source : [Différents types de pores. Une méthode pour connaître la connectivité-researchgate.net](https://www.researchgate.net/publication/312222222))



4.2.1.3. Effet renard hydraulique

Les digues en surface peuvent causer des effets d'**érosion régressive** (figure 30). On appelle ce phénomène l'effet de **renard hydraulique**. L'eau pénètre dans le sol (perméable) par la surpression de la colonne d'eau, elle suit une ligne de courant qui engendre des courants d'eau et de mouvements de terrains inattendus.

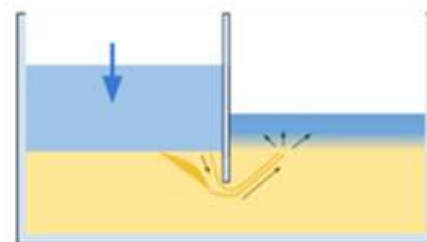


Figure 30 Schématisation de l'effet renard hydraulique

Plusieurs solutions pour minimiser l'effet d'érosion régressive sont possibles :

- ✓ L'utilisation de barrières et de tapis imperméables allongent les lignes de courant et les rendent plus sinueuses (figure 31) [8, 9]
- ✓ La recharge évite les affaissements de terrain (figure 31)
- ✓ Le puits de décharge permet de diminuer de diminuer les gradients hydrauliques en résorbant le trop plein de liquide (figure 31)

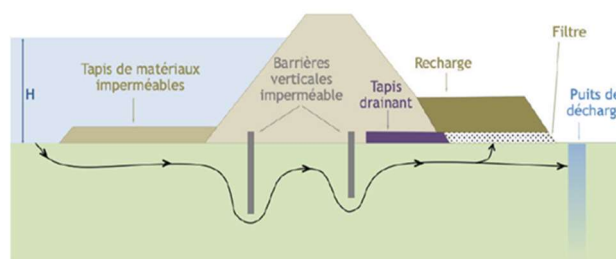


Figure 31 : diminuer l'effet renard

5. Vérification expérimentale de l'efficacité des solutions d'aménagement proposées

5.1. Conception du matériel expérimental

Dans le cadre de cette étude, des expériences ont été menées pour évaluer l'efficacité de quelques digues de notre conception dans la réduction de l'immersion côtière due à la houle (figure 32). Ces expériences ont été réalisées au moyen d'une cuve à vague spécialement conçue à cet effet (figure 33)

La cuve à vague offre un environnement contrôlé permettant de simuler différentes conditions de vagues et d'observer l'interaction entre les digues et la houle.

DIMENSION DES MODULES :

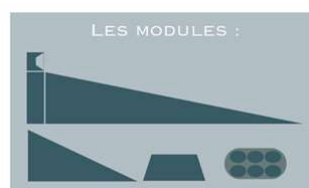
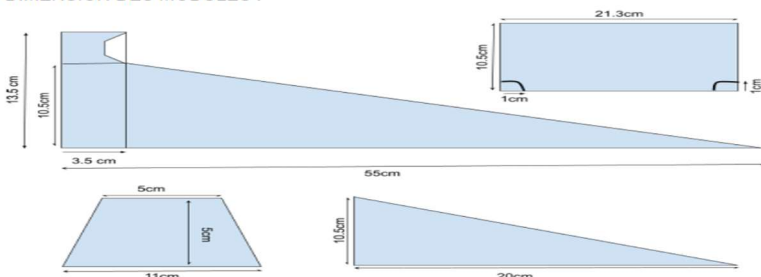
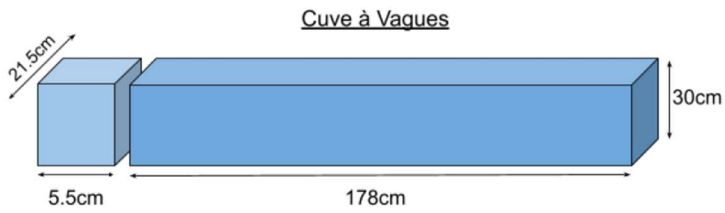


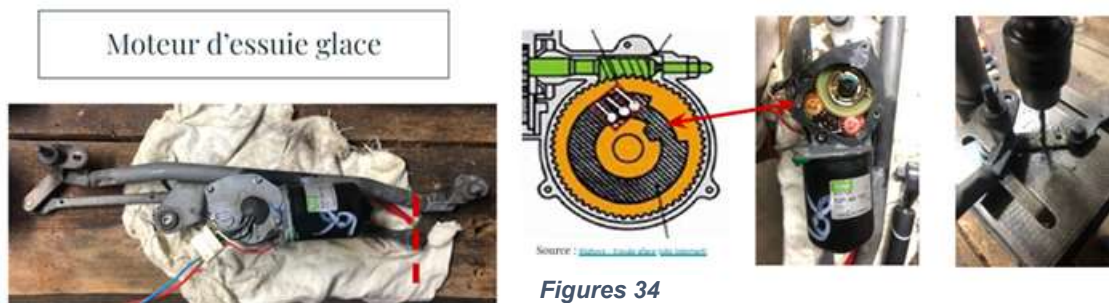
Figure 32 : matériels utilisés dans l'expérimentation (notre contribution)

Réalisation d'une cuve à vague



Figures 33

La production d'une « **houle régulière** » a été possible à l'aide d'un batteur mécanique oscillant (essuie-glace d'une voiture) (figures 34). On a pu alors fixer les paramètres qui contrôlent le comportement de cette « houle » : **période**, **amplitude** (imposé par le mécanisme de l'essuie-glace) et **hauteur de l'eau** dans le bassin



Figures 34

5.2. Analyse statistique du mouvement de l'eau dans la cuve à vagues

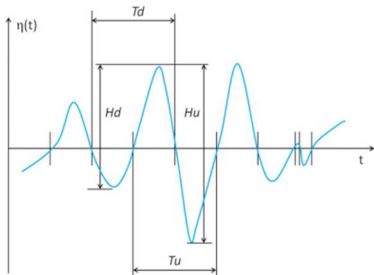


Figure 35

Le profil d'une houle réelle est en général très complexe. La hauteur totale et la période sont calculées en décomposant le profil en une succession d'ondes élémentaires. Il y a deux possibilités pour évaluer la hauteur (Figure 35) :

- La hauteur d'un creux à la crête suivante est notée H_d ;
- D'une crête au creux suivant c'est la hauteur notée H_u .

Les valeurs moyennes de H_d et de H_u sont les mêmes et donnent une estimation de la hauteur total H (figure 35). On fait de même pour la période avec T_d et T_u pour avoir une estimation de la période T (figure 35)

Dans notre pratique expérimentale, on s'est intéressé plutôt à ce que l'on appelle la hauteur significative H_s qui correspond à la valeur moyenne des hauteurs du tiers des vagues les plus hautes.

5.3. Etude expérimentale

5.3.1. Comparaison entre utilisation/non-utilisation d'une digue

Nous avons souhaité observer dans un premier temps si une digue possède réellement une capacité à réduire la hauteur d'une vague submersive.

La figure 36 illustre l'évolution temporelle de la hauteur de vague en présence, ou non, d'une digue.

Cette évolution a été suivie grâce à un bouchon de liège, posé sur l'eau et guidé dans sa flottaison par une tige métallique en fonction de l'évolution de la vague submersive en absence / en présence de la digue.

Le graphique obtenu (figure 36) montre une différence dans l'amplitude de la vague submersive en présence / en absence d'une digue.

Conclusion de notre expérience : La présence d'une digue engendre une réduction de 35 % de l'amplitude des vagues submersives par rapport à son absence.

Comme nous avons fabriqué des digues de différentes formes, adaptables à différentes configurations du littoral, nous avons voulu comparer leurs efficacités respectives.

5.3.2. Comparaison entre utilisation/non-utilisation d'un perré sur grande plage

Le test de l'utilisation d'un perré / non utilisation d'un perré sur une grande plage pour empêcher une submersion marine a donné une atténuation de l'ordre de 25 % de l'amplitude de la vague submersive, illustrée par la figure 37 et figure 38.

Comparaison utilisation/ non utilisation d'une digue

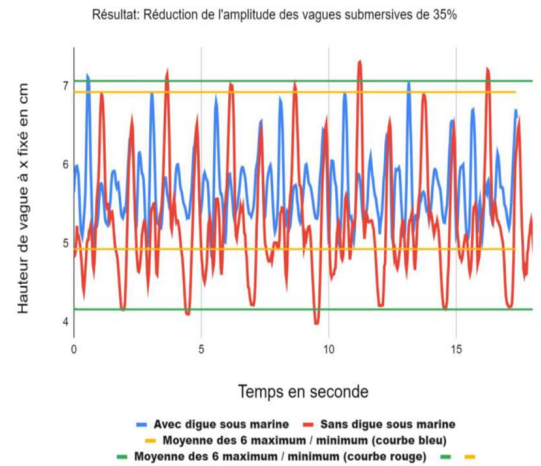


Figure 36 : comparaison utilisation / Non utilisation d'une digue Source auteur

Comparaison utilisation/ non utilisation d'un perré sur grande plage

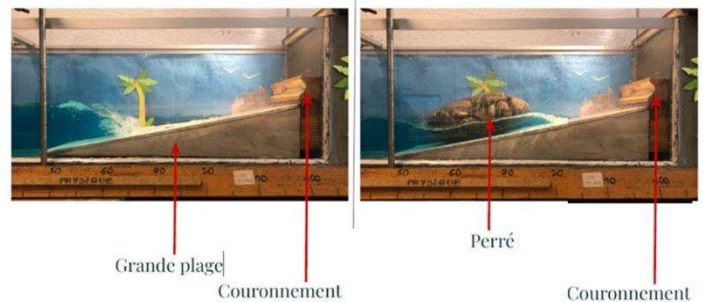
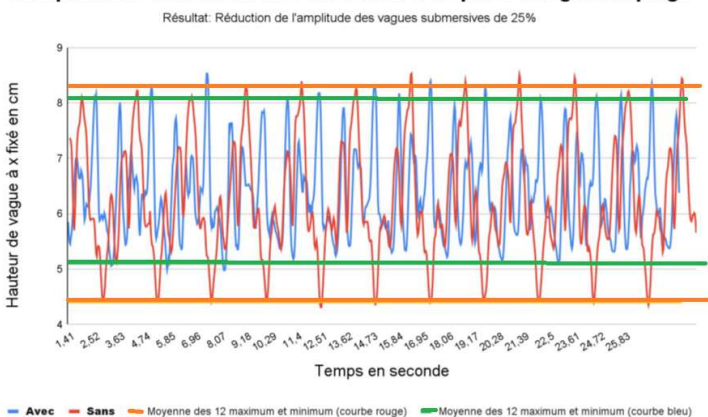


Figure 37 : Comparaison utilisation / non utilisation d'un perré sur grande plage

Figure 38 : résultat de la Comparaison utilisation / non utilisation d'un perré sur grande plage

5.3.3. Efficacité d'une digue sous-marine

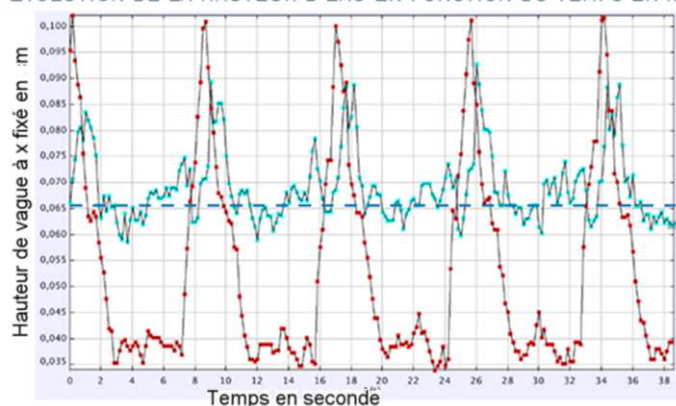
Les figures 39, 40 et 41 illustrent l'évolution temporelle de la hauteur des vagues en présence d'une digue sous-marine.

Cette évolution a été suivie grâce à un bouchon de liège, posé sur l'eau et guidé dans sa flottaison par une tige métallique en fonction de l'évolution de la vague submersive, en amont (trait rouge) et en aval (trait bleu) de la digue (figure 39)



Figure 39

ÉVOLUTION DE LA HAUTEUR D'EAU EN FONCTION DU TEMPS EN X FIXÉ.



MOYENNE HAUTEUR VAGUE AVANT DIGUE	6.4 cm	MOYENNE HAUTEUR VAGUE APRES DIGUE	2.9 cm
POURCENTAGE ATTÉNUATION	46.6 %	POURCENTAGE ATTÉNUATION (RELATIVE HAUTEUR VAGUE)	22.8 %

Figure 41

HAUTEUR D'EAU
6,6 cm
— AVANT DIGUE
— APRES DIGUE

Figure 40

Cette comparaison de l'amplitude de la vague entre l'amont et l'aval d'une digue sous-marine (figures 39, 40 et 41), montre un constat significatif : une atténuation de 22.8 à 46.6 %

5.3.4. Efficacité d'une digue rocailleuse

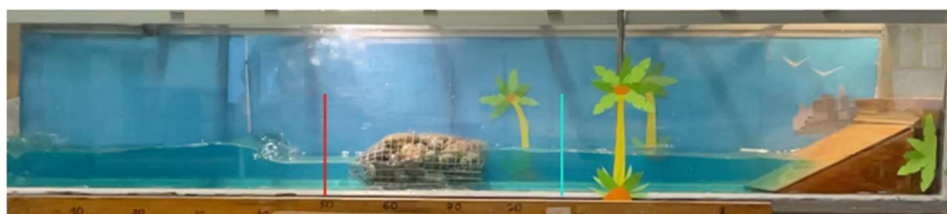


Figure 42 : utilisation d'une digue rocailleuse

Les figures 42, 43 et 44 illustrent l'évolution temporelle de la hauteur des vagues en présence d'une digue rocailleuse.

Cette évolution a été suivie grâce à un bouchon de liège, posé sur l'eau et guidé dans sa flottaison par une tige métallique en fonction de l'évolution de la vague submersive, en amont (trait rouge) et en aval (trait bleu) de la digue (figure 42)

MOYENNE HAUTEUR VAGUE AVANT DIGUE	8,5 CM	MOYENNE HAUTEUR VAGUE APRES DIGUE	7,4 CM
POURCENTAGE ATTENUATION	87 %	POURCENTAGE ATTENUATION (RELATIVE HAUTEUR VAGUE)	65 %

Figure 44

L'atténuation de la digue rocailleuse est assez significative elle est comprise entre 65 et 87 % et nous montre une efficacité meilleure.

ÉVOLUTION DE LA HAUTEUR D'EAU EN FONCTION DU TEMPS EN X FIXÉ.

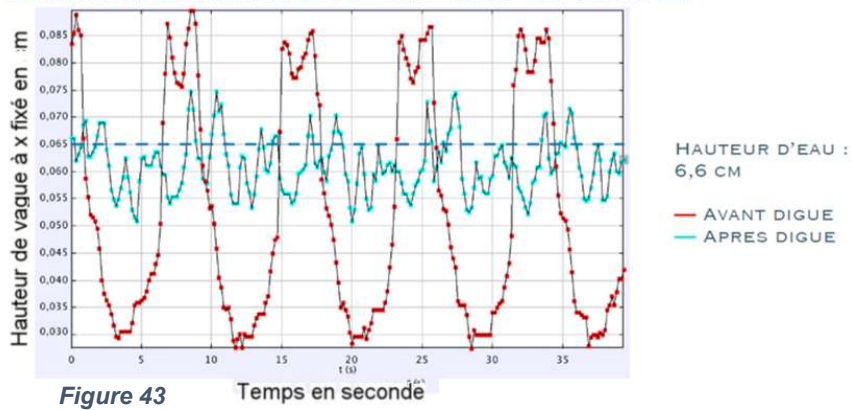


Figure 43

5.3.5. Un aperçu du Tableau de mesures et de quelques graphiques

Absence digue

Moyenne
0,00572257
max
0,0214603
min
-0,0035215

digue sous-marine

Moyenne
0,00161437
max
0,00948856
min
-0,0057986

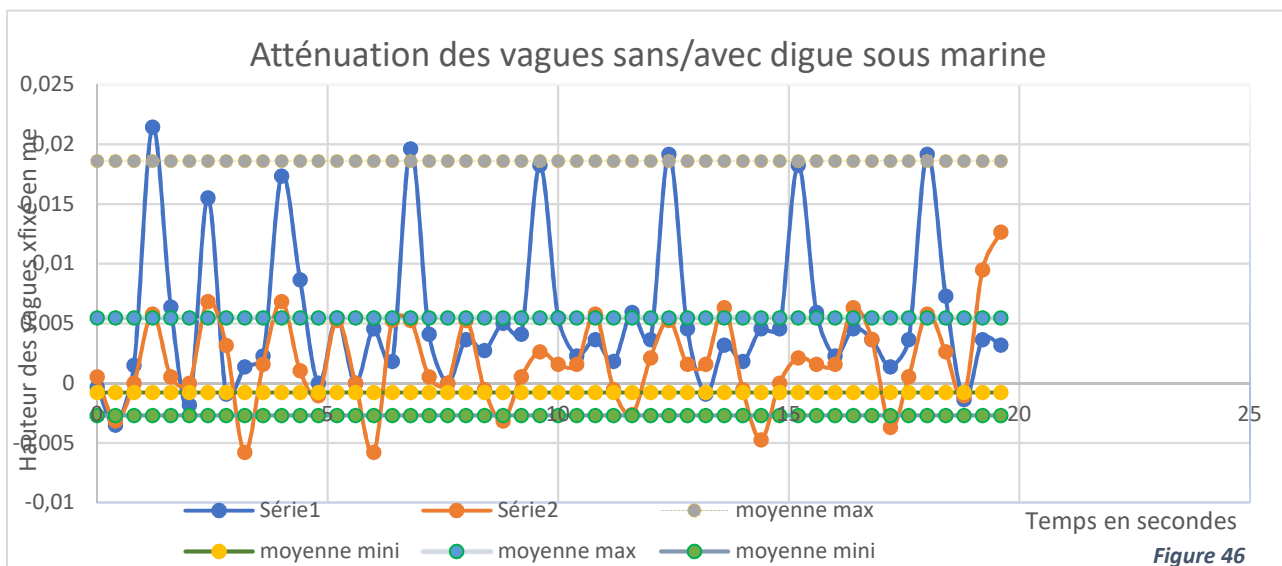
Moymax_{rouge} selon graphique = 0,04375525/8 = 0,00546907

Moymini_{rouge} selon graphique = - 0,02161283/8 = - 0,00270160375

Moymax_{bleue} selon graphique = 0,1488524/8 = 0,01860655

Moymini_{bleue} selon graphique = - 0,006288518/8 = - 0,00078606475

Temps (s)	ya (m)	ys (m)	max avec digue	min avec digue	maxsansdigue	minsansdigue
0	-0,0003253	0,00052714	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
0,4	-0,0035215	-0,0031629	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
0,8	0,00150108	0	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
1,2	0,0214603	0,00579857	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
1,6	0,00639243	0,00052714	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
2	-0,0018264	0	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
2,4	0,0155245	0,00685285	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
2,8	-0,0009132	0,00316285	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
3,2	0,00136981	-0,0057986	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
3,6	0,00228301	0,00158143	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
4	0,0173509	0,00685285	0,01860655	-0,0007861	0,00546907	-0,0027016
... etc						



$$\text{Atténuation} = 1 - H_r/H_b = 1 - 0,00817/0,0194 = 0,578 = 57,8 \%$$

5.4. Critique du Modèle expérimental

Tout modèle expérimental comporte des limites et des simplifications. L'analyse des résultats expérimentaux a révélé une certaine incertitude numérique liée à la mesure et aux variations des conditions de « la mer » dues à notre moteur.

- ✓ Pour notre modèle, la taille des vagues ainsi que l'échelle de notre cuve sont très faibles. L'écoulement dans le cas réel est différent mais la vague vérifie la condition de propagation.
- ✓ Notre moteur crée une double vague.
- ✓ Notre cuve à vagues n'est pas assez longue et ne présente pas d'écoulement vers l'avant et par conséquent elle crée une réflexion.
- ✓ Incertitudes : incertitude sur la mesure lors du pointage évaluée à 0.5 mm soit environ 1 %
- ✓ Incertitude de type A sur la réduction de la hauteur des vagues $\sigma = 0.1$ mm

6. Conclusion

Les données expérimentales recueillies ont fourni des informations précieuses sur l'efficacité des digues utilisées dans la réduction de l'immersion côtière due à la houle. Ces résultats ont montré que les digues peuvent réduire de manière significative l'impact des vagues et de la houle, en particulier lorsque leur conception est adaptée aux conditions locales.

On peut noter que la digue, submergée ou non, reste un aménagement performant pour réduire la puissance des vagues formées pendant les tempêtes pouvant déferler sur le littoral.

L'installation de ces digues doit respecter des règles géographiques, économiques et d'écosystème afin de s'intégrer au mieux dans l'environnement

Cependant, il est important de noter que leur efficacité peut varier en fonction notamment de la configuration de la digue, de la hauteur, de la période et de la direction des vagues

7. Ouverture

Bien que les digues puissent être efficaces dans de nombreuses situations, il est important de noter que d'autres approches qui prennent en compte l'aménagement du territoire, la restauration d'écosystèmes côtiers, la planification urbaine, émergent. Elles sont plus écologiques, plus respectueuses de l'environnement et sont de plus en plus prises en considération pour faire face aux défis posés par l'immersion côtière. Parmi ces possibilités, nous identifions :

- ✓ La gestion de la Zone Côtière,

Par la création d'une zone tampon, une zone humide permettant de stopper la montée des eaux en stockant temporairement l'eau de mer pendant les événements de crues. (ex : marais salants,...)

Prenons l'exemple mis en place en Camargue, où le territoire est susceptible d'être submergé par la montée du niveau de la mer. Les marais salins sont, en plus d'être une importante zone de biodiversité, un rempart contre la montée des eaux. Cette stratégie est doublement payante. Moins onéreuse que la construction de digues (ce qui a permis d'économiser plusieurs millions d'euros) mais aussi génératrice d'une biodiversité florissante.



Figure 46 Simulation de la Nasa montrant la montée des eaux en Méditerranée, ici la Camargue.

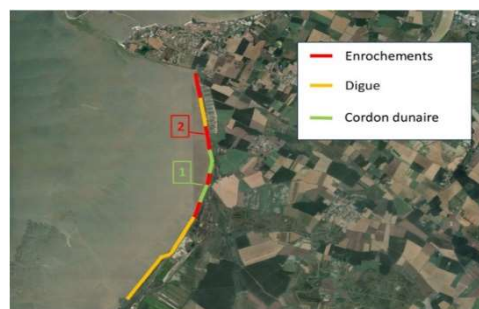


Figure 47 Marais de Brouage, google Earth

Il existe également le projet d'Adapto, financé à 60 % par l'UE dans le cadre du programme LIFE pour préserver le littoral comme le marais de Brouage en Charente-Maritime avec un mélange de digues, enrochements, et cordon dunaire.

- ✓ Technologies Innovantes,

De nombreuses technologies sont en cours de développement, telles que les récifs artificiels et les barrières de sable. Ou encore les digues mangrove :

DIGUES À AGDE (MANGROVE)

ATTÉNUATION DE LA HOULE
AUTOUR DE 70%
IMPACT SUR LES VENTS

LUTTE CONTRE L'ÉROSION ET
LA MONTÉE DES EAUX

ABSENCE DE PHÉNOMÈNES
DE RÉFLEXION,
DIFFRACTION ET SHOALING

INOFFENSIVE POUR L'ÉCOSYSTÈME
PAS DE PHÉNOMÈNES DE SÉDIMENTATIONS

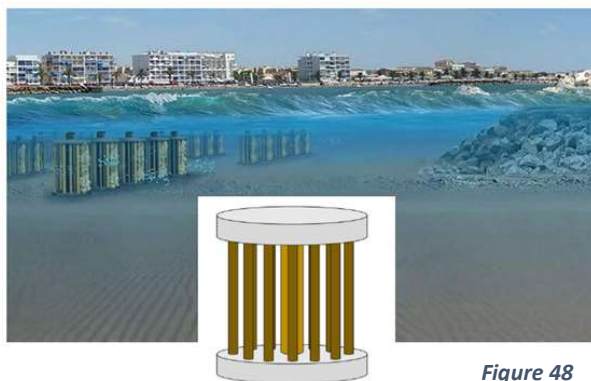


Figure 48

Ces approches méritent une exploration accentuée et continue pour compléter les solutions traditionnelles telles que les digues tout en prenant en compte la biodiversité.

✓ Energie houlomotrice

L'énergie cédée par le vent à la houle peut être récupérable au niveau d'une digue avec un système pivotant, entrainé par le mouvement de l'eau au passage des vagues. C'est une question qui a pris toute son importance ces dernières années dans le cadre de la recherche des énergies renouvelables pour diminuer l'empreinte carbone dans notre atmosphère.

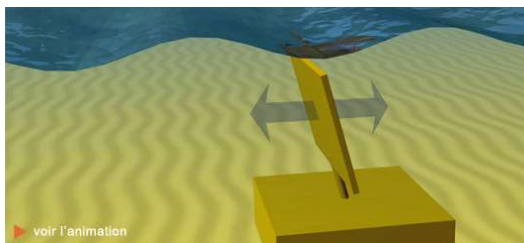


Figure 49 Paroi oscillante immergée

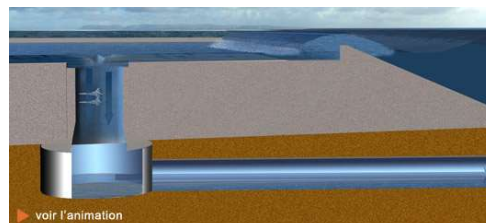


Figure 50 Piège à déferlement

✓ Digues plus éco-responsables

De nombreux scientifiques travaillent sur des nouveaux projets d'éco-ingénierie dans lesquels ils veulent modifier la conception de la digue traditionnelle de manière à réduire l'impact environnemental négatif, en introduisant de nouveaux matériaux.

Les analyses sur les différentes digues traditionnelles utilisées montrent que très peu de plantes, coraux et autres organismes se développent autour.

A Hong Kong par exemple, des chercheurs ont remarqué que les digues artificielles installées n'ont pas la complexité naturelle des côtes rocheuses. Ces digues peuvent atteindre des températures très élevées lorsqu'elles sont exposées à marée basse. Ces fortes températures empêchent de se développer des espèces marines comme les huitres filtreuses, qui améliorent la qualité de l'eau, ce qui affaiblit l'écosystème côtier.



Ils ont alors conçu des tuiles « éco-ingénierie » possédant des crevasses et des surfaces rainurées, sur la base d'une combinaison de principes écologiques et techniques.

Figure 51 (Source : <https://researchportal.hk/en/cases/4>)

La température des tuiles « éco-ingénierie » (à gauche) est plus basse que celle des tuiles plates (à droite) en été.

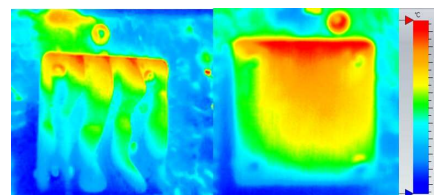


Figure 52 (source : <https://phys.org/news/.html>)



Figure 53 (Source : <https://phys.org/news/.html>) - après 12 mois de déploiement -

Ils ont aussi remarqué avec intérêt que sur les dalles « éco-ingénierie », des escargots se sont installés et se sont développés une année plus tard.

Ces tuiles ont été déployées dans 13 autres sites à travers le monde dont Londres et Sydney. Il a été constaté une amélioration systématique de la biodiversité des invertébrés marins sur ces emplacements.

8. Epilogue

Ce projet a été pour notre groupe l'occasion d'être confronté à une problématique majeure pour le futur de l'humanité, d'en prendre conscience et d'essayer de la partager avec notre entourage, à travers différentes interventions dans nos classes respectives de notre lycée, par une pédagogie participative (jeux, débats, fresque du climat, ...) et peut être, si vous jugez que notre travail mérite d'être partagé, à travers le concours c génial.

Références bibliographiques

- [1] Changement climatique et phénomènes extrêmes | Organisation météorologique mondiale (wmo.int)
- [2] <https://www.ecologie.gouv.fr/changement-climatique-causes-effets-et-enjeux>
- [3] <https://www.topito.com/top-pays-touches-rechauffement-climatique>
- [4] Wikipédia
- [5] Gwendoline Arnaud : Houle à la côte : propagation, impacts et ouvrages innovants : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01497496/document>
- [6] Wikiland : https://www.wikiwand.com/en/Wind_wave
- [7] Elodie Laffitte : Modélisation de la propagation de la houle en présence de courants cisailés et par bathymétrie variable : <https://theses.hal.science/tel-02484402/document>
- [8] Jean-Marc Rousset : Sollicitations d'une digue Jarlan sous l'action de houles aléatoires – Cas du port de Dieppe : <https://hal.science/tel-03485423/document>
- [9] Clément DESODT – Hélène HORSIN MOLINARO : Phénomènes de boulangage et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>
- [10] Spécimen Hatier terminale spécialité physique-chimie
- [11] TEMPERVILLE André : Encyclopédie de l'environnement : Vagues et houles - Encyclopédie de l'environnement : <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/vagues-houles/>
- [12] Clément Bouvier : Barres d'avant-côte et trait de côte : dynamique, couplage et effets induits par la mise en place d'un atténuateur de houle : <https://theses.hal.science/tel-02294118/document>
- [13] Jean Bougis ingénieur Conseil <https://www.hisse-et-oh.com/store/medias/tavern/5dc/ad2/973/original/5dcad29739819f24ea386ebf.pdf>
- [14] Nielsen P, Coastal and estuarine Processes, Advanced Series on Ocean Engineering vol, 29
- [15] Institut Jean Le Rond d'Alembert : Houle et Vagues : <http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/COURS/MFEnv/MFEhoule.pdf>
- [16] Qu'est-ce qu'une digue : <https://www.france-digues.fr/les-digues/quest-ce-quune-digue-copy/>
- [17] Nadia Sénéchal : Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf : https://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/bonneton/Divers/These_Senechal.pdf
- [18] https://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782340013353_extrait.pdf
- [19] https://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782340013353_extrait.pdf
- [20] (<https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1956/06/lhb1956040.pdf>)
- [21] (<http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/COURS/MFEnv/MFEhoule.pdf>)
- [22] <https://reporterre.net/Hauts-de-France-Lacanau-Camargue-la-montee-des-eaux-devient-critique#4>