

TPE SUR LA VAGUE

Bruno Duchet

Yannick Nabil-Moreau

Damien Verdaguer

Introduction

Fascinant spectacle que le mouvement incessant des vagues, obéissant aux mêmes règles depuis des millénaires, interpellant navigateurs, chercheurs ou simples curieux comme des élèves de première S.

Ainsi le mécanisme des vagues s'est progressivement laissé découvrir ces derniers siècles, après d'intenses recherches faites de façon complémentaire par les physiciens et les mathématiciens qui se sont succédés jusqu'à nos jours.

Ce que nous proposons dans ce TPE constitue plutôt une approche globale de la vague, sous un aspect physico- mathématique en répondant à une problématique qui nous permettra de suivre les différentes étapes de sa vie, de sa naissance en eaux profondes jusqu'à sa « mort » sur nos rivages en déferlant :

Comment expliquer l'évolution de la structure d'une vague pendant sa vie?

Cette problématique nous amènera, en plus d'étudier la vague et l'onde sous un aspect théorique, à nous intéresser aux facteurs environnementaux qui jouent un rôle essentiel dans sa structure et à appuyer nos propos par des expériences concrètes en laboratoire ou



demandant l'utilisation de l'outil informatique.

I les vagues, approche théorique

1) qu'est ce qu'une vague ?

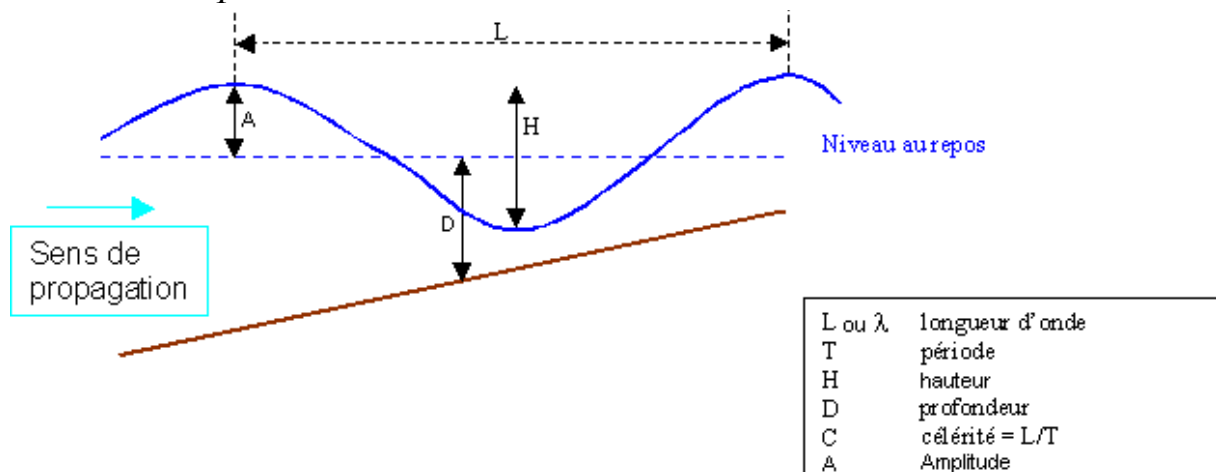
Une vague est une onde mécanique qui se propage à la surface de l'eau entre deux fluides, en l'occurrence l'eau et l'air.

Les ondes correspondent à des déformations périodiques d'une interface. En océanographie, les ondes de surface se matérialisent par une déformation de la surface de la mer, c'est-à-dire une déformation de l'interface entre l'atmosphère et l'océan.

Une onde se caractérise par :

Sa période, T : c'est l'intervalle de temps qui s'écoule en un point donné entre le passage de 2 crêtes successives (de 0,1 sec à 30 secondes)

Sa fréquence : $\frac{2\pi}{T}$



Sa longueur d'onde, λ ou L (selon le schéma proposé) : La longueur d'onde correspond à la distance horizontale entre deux crêtes ou deux creux de deux vagues successives.

Plus la longueur d'onde d'une vague est importante, plus sa vitesse est grande (la vitesse de la vague se traduit par le rapport : longueur d'onde sur une durée. Donc plus la longueur d'onde est importante plus la vitesse l'est aussi)

Sa hauteur, H : c'est la dénivellation verticale entre la crête et le creux (si la crête est déséquilibrée il apparaît de l'écume et la mer « moutonne »). Les vagues de plus de 12 m de hauteur sont très rares, on admet cependant l'existence de houle dont la hauteur moyenne est de 20 m.

Son amplitude, A : l'amplitude correspond à la distance verticale entre la crête et le niveau de l'eau au repos, soit une demi hauteur. Lorsque la vague atteint le rivage, son amplitude varie en fonction du relief sous-marin et de la configuration du rivage.

Sa vitesse de propagation ou vitesse de phase (célérité) : $c = \frac{\lambda}{T}$ (On peut faire le parallèle

avec la formule $v = \frac{d}{t}$; λ est la distance horizontale et T durée entre 2 crêtes. On a bien le rapport d'une distance sur une durée) La célérité correspond à la vitesse de propagation d'une crête d'une vague. La célérité de la vague croît avec son amplitude. Elle est différente selon si l'onde est courte ou longue. Lorsque la longueur d'onde est au moins deux fois plus faible que la profondeur de l'océan on parle d'onde courte, ceci se produit en eau profonde. A l'opposé, lorsque la longueur d'onde est au moins vingt fois supérieur à la profondeur, l'onde est qualifiée de longue. Ce phénomène intervient en eau peu profonde. La formule permettant de calculer la célérité des est différente selon si les ondes sont courtes ou longue.

Dans le cas des ondes courtes : $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$; cette formule est un rapport, λ est au numérateur et varie en fonction du type de vague ; tandis que le dénominateur, 2π , reste constant. On peut donc en déduire que l'onde ayant la longueur d'onde la plus importante se propagera le plus rapidement (la houle est un exemple d'ondes courtes)

Dans le cas des ondes longues : $c = \sqrt{gh}$, la célérité correspond au produit de g par h comme g reste constant (ce paramètre représente l'attraction de l'apesanteur en un point donnée du globe et vaut en moyenne $9,8 \text{ N.Kg}^{-1}$), c 'est la variation de la profondeur qui induira une variation de la célérité. Ainsi à l'approche des côtes, lorsque h diminuera, la célérité diminuera aussi.

Sa cambrure ou rapport d'aspect : $C = \frac{H}{\lambda}$. La cambrure est le rapport entre la hauteur et la longueur d'onde (nous utiliserons cette formule dans la partie consacrée au déferlement)

Son FETCH : le Fetch correspond à la distance sur laquelle le vent souffle pour engendrer des vagues. Pratiquement, plus le vent souffle sur une grande distance plus la vague engendrée sera importante.

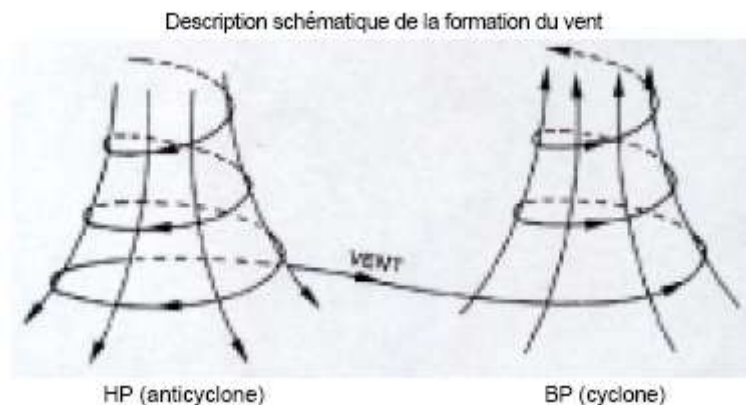
2) la formation des vagues

Contrairement aux idées reçues la marée, surtout d'origine lunaire, n'est pas à l'origine des vagues

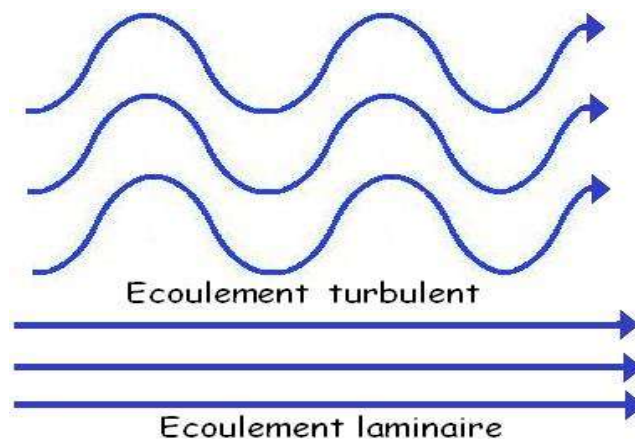
La principale cause de la formation des vagues est le vent (il correspond à un déplacement de particules d'air des hautes pressions vers les basses pressions (c'est-à-dire des zones d'anticyclone vers les zones de dépression)). La rencontre d'air chaud avec les



masses d'air froid crée des dépressions. Cette dépression est une masse d'air froid, qui aspire l'air des zones environnantes de pression plus haute créant ainsi le vent.



La vague naît dès l'apparition du vent. Si la brise marine est régulière à la surface de l'eau calme, l'air en mouvement adhère aux particules d'eau, pousse l'eau devant lui, provoquant ainsi une élévation des particules d'eau à l'avant alors qu'un creux se forme à l'arrière engendrant des rides. Le vent s'écoule de façon turbulente (les particules d'air n'adoptent pas une trajectoire rectiligne (dit écoulement laminaire) mais une trajectoire « sinusoïdale ») et provoque l'apparition de rides plus ou moins marquées en fonction de sa force (l'amplitude des vagues augmente proportionnellement avec la force du vent).



Ces rides ainsi formées donnent une prise au vent qui les renforce et les fait grandir à condition que sa vitesse soit égale à 4 nœuds (le nœud est une unité de mesure de vitesse utilisée en aéronautique et en marine, un nœud correspond à $1,852 \text{ km.h}^{-1}$). Mais le vent est rarement régulier et va engendrer des vagues de différentes tailles. Les plus petites se briseront et alimenteront les plus grosses en énergie pour les renforcer. Ce processus se poursuit en haute mer sur des surfaces pouvant s'étendre sur des milliers de km^2 appelée surfaces génératrices. La grosseur de la vague va donc dépendre de la force du vent, mais également de la durée de son action et du Fetch : en clair plus le vent est fort et plus il souffle pendant une longue période, plus le Fetch est important et plus la vague sera grosse. Un transfert d'énergie s'opère du vent au milieu marin ; le vent cède de l'énergie à la vague. A titre indicatif, un vent soufflant à 40 km/h sur 200 km durant 15 heures engendre des vagues de 2,5 mètres d'amplitude...et des vagues de 11 à 14 mètres s'il souffle pendant la même période à 100 km/h sur 400 km .

Seules les vagues ayant une vitesse inférieure ou proche de celle du vent pourront être entretenues et voyager à travers l'océan. Les autres déferleront et formeront ce que l'on appelle les « moutons » ou mousse du large.

A partir du moment d'équilibre (moment où la structure de la vague passe de rides à un véritable mouvement d'oscillation), le mouvement n'a plus besoin d'être entretenu, il est sans perte d'énergie mis à part les frottements. Ce mouvement sans perte d'énergie est appelé « Houle ». Le mouvement des vagues est dû au vent, mais aussi à la pesanteur qui entretient le mouvement d'oscillation (en effet lorsque les particules d'eau arrivent au sommet de la trajectoire, elle s'affaissent sous l'action de leurs poids). Ces deux paramètres déterminent la structure de la vague.



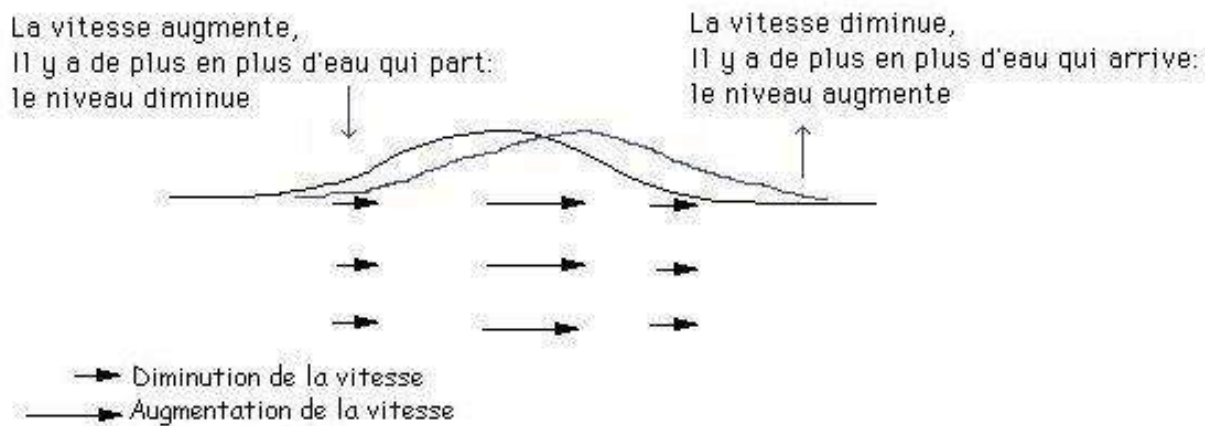
Tableau de Jim WARREN

3) La propagation d'une vague

Nous avons vu précédemment que les vagues naissent et grandissent sous l'action du vent, mais à partir du moment d'équilibre la propagation de la vague ne nécessite plus l'action du vent.

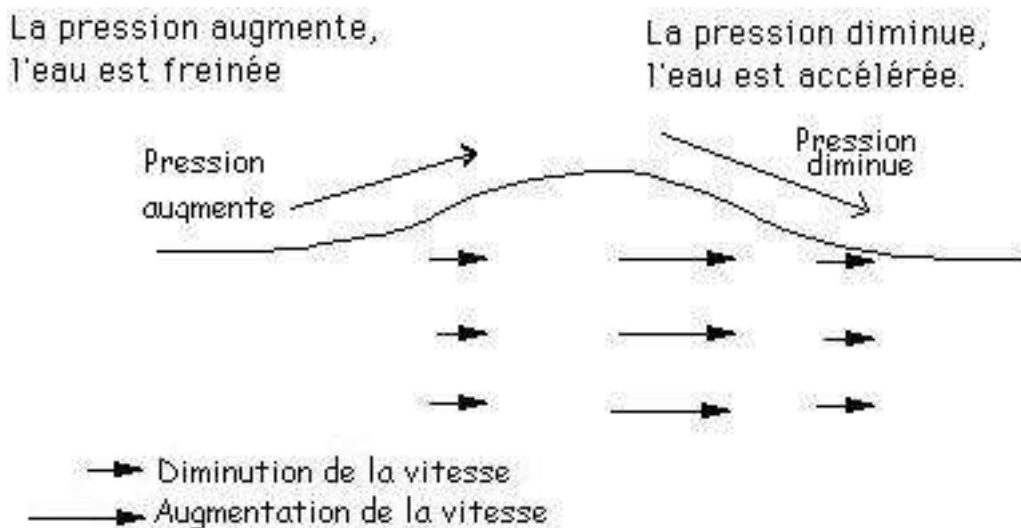
Quel est alors le moteur de son déplacement ?

Par conservation du débit, lorsque la vitesse des particules d'eau augmente, la vague est étirée, sa structure s'en voit modifiée comme une feuille de papier bombée sur laquelle on tirerait sur ses extrémités : on observe alors un étirement de la surface de l'eau. Mais là où il y a une diminution de la vitesse, le niveau d'eau augmente : c'est le phénomène inverse qui se produit. Pour reprendre l'analogie de la feuille, c'est comme si ici on poussait sur les bords de la feuille (le ralentissement des particules d'eau « décolle » la surface de l'eau) ; on s'aperçoit de l'apparition d'une « bosse » qui se déplace.



Pour mieux comprendre le phénomène de variation des pressions en fonction de la vitesse, revenons au 18^{ème} siècle avec le physicien **Daniel BERNOULLI** qui a porté ses recherches sur la mécanique des fluides (aussi bien l'eau que l'air) et a énoncé le principe suivant : dans un fluide en écoulement, la vitesse et la pression varient en sens inverse. Ces résultats peuvent être mis en rapport avec la variation des vitesses et des pressions dans le cas d'une vague.

La pression de la « bosse » est maximale en son sommet. En effet comme vu précédemment, la vitesse des particules d'eau diminue de part et d'autre de la bosse et augmente au niveau de la bosse pour la faire tendre à sa position plane d'origine. Lorsque l'on pousse l'eau celle-ci monte (ici apparition de la bosse) ce qui entraîne une augmentation de la pression et l'eau est freinée. La pression décroît au fur et à mesure que l'on s'en éloigne (phénomène inverse) : la vitesse augmente. Le gradient de pression ralentit le fluide.



Ce phénomène permet l'avancement de la vague à travers l'océan jusqu'à ce qu'elle se meurt sur les côtes de nos plages ou en eau profonde si elle est trop petite.

4) Le mouvement des particules

La théorie d'Airy (**physicien anglais du 19^{ème} siècle**) que nous allons développer dans les lignes qui suivent concerne surtout la houle qui n'est en fait qu'une suite indéfinie d'ondulations parallèles sensiblement identiques mais cette théorie peut aussi s'appliquer au vagues. La houle est une sorte de vague théorique, parfaite qui ne subit aucune modification de la part de son environnement)

Le mouvement des particules (mouvement de l'ensemble des particules d'eau) est une oscillation périodique qui se propage à vitesse plus ou moins grande selon la profondeur de l'océan. La crête de la vague s'avance sous l'effet de cette propagation, aussi chaque molécule d'eau est animée d'un mouvement orbital qui s'accompagne d'un faible mouvement d'avancée un peu plus ample que le mouvement de retrait de telle sorte que chaque molécule ne se retrouve pas exactement à son point de départ.

Dans leur mouvement les vagues font tourner sur place les particules voisines de la surface, sur des orbites circulaires dont le diamètre est égal à la hauteur de la vague. Ce mouvement se continue sous l'eau mais avec une amplitude qui diminue avec la profondeur : à une profondeur égale à une demi-longueur d'onde de la vague, le diamètre des orbites décrites par les particules d'eau est 25 fois plus petit qu'à la surface. La colonne d'eau située au-dessus de la particule considérée « pèse » sur cette dernière, la limitant dans ses mouvements. Si la particule est située très profondément, la colonne d'eau aura une certaine hauteur (qui correspond donc à la profondeur de la particule) et aura un poids très important : le cercle représentant la trajectoire de la particule a donc un diamètre plus petit que celui représentant la trajectoire d'une particule proche de la surface car la colonne d'eau située au-dessus sera moins importante et pèsera donc moins.

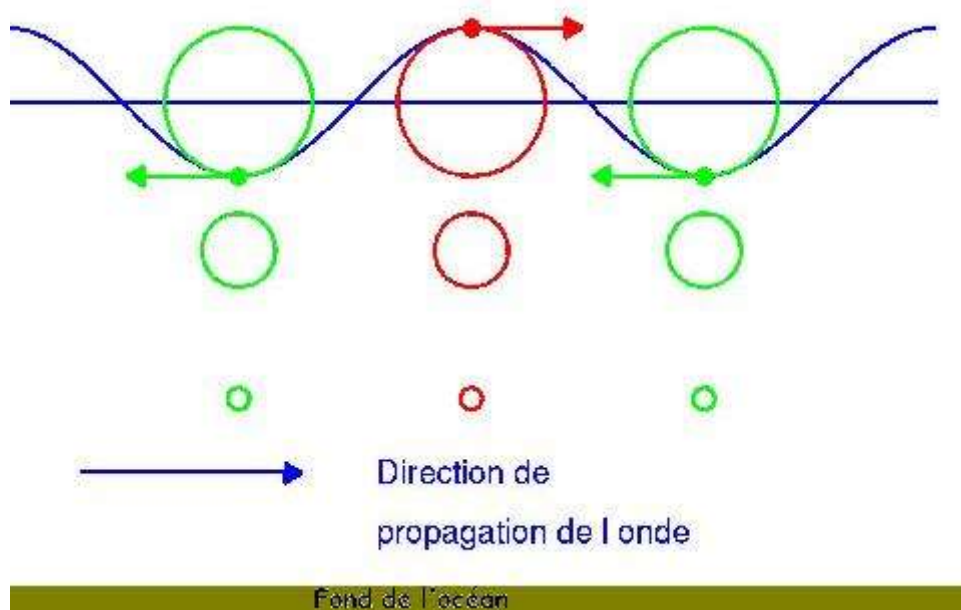
Lorsque les vagues s'approchent du rivage le mouvement des particules est modifié. Nous proposons de l'expliquer ici de façon brève pour s'inscrire dans la continuité de la vie d'une vague, mais nous y reviendrons dans la deuxième partie du TPE. A l'approche du rivage elles arrivent dans des eaux de profondeur inférieure à la moitié de leur longueur d'onde. Leur période ne change pas, mais leur longueur d'onde décroît, leur vitesse diminue, alors que leur hauteur augmente. Quand la profondeur de l'eau de la côte diminue, les particules d'eau situées sur la crête de la vague n'ont plus assez de place pour décrire des orbites : la vague se brise. Les particules d'eau sont projetées en avant dans une ligne d'écume. Selon la configuration du rivage, la vague surgit, se renverse ou plonge. Puis le reste de la vague s'étale : c'est *le ressac*.

Voici maintenant deux schémas illustrant le mouvement des particules en eau profonde et peu profonde :

- ***en eau profonde***

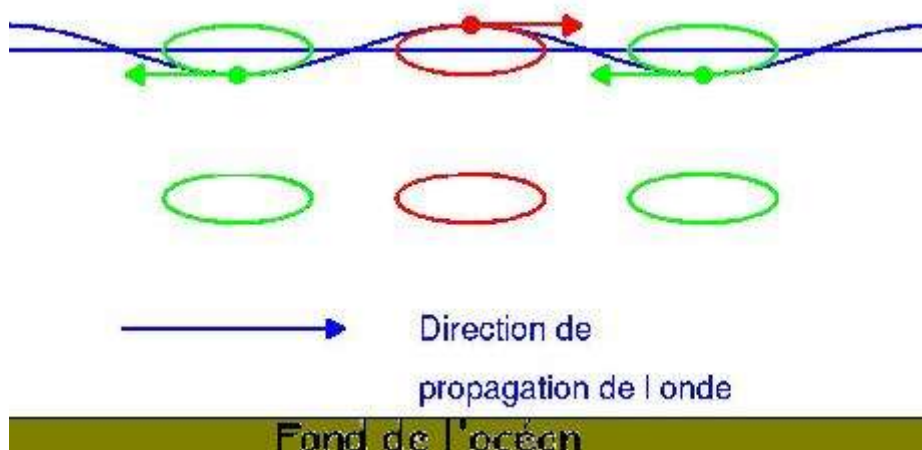
En eau profonde, les trajectoires des particules d'eau sont des cercles dont le diamètre diminue exponentiellement avec la profondeur ($r = ae^{kz}$ avec a = amplitude, k = longueur d'onde et z = profondeur. Nous ne pouvons démontrer cette formule, mais nous l'utilisons néanmoins pour bien insister sur la décroissance brutale du diamètre des cercles).

En surface le diamètre orbital correspond à la hauteur de la vague.



- *en eau peu profonde*

Dans les eaux peu profondes, les cercles s'aplatissent pour former des ellipses de plus en plus écrasées au fur et à mesure que l'on s'approche du fond. Le mouvement au fond n'est plus qu'un mouvement rectiligne de va-et-vient.



Ainsi les vagues, après leur naissance sous l'action du vent, se propagent à la manière d'ondes mécaniques. Mais, après avoir parcouru des milliers de kilomètres sans connaître de grosses modifications dans leur structure, les vagues atteignent enfin le rivage pour s'évanouir sur nos plages. D'importantes modifications de sa structure s'opèrent durant la phase finale de déferlement.

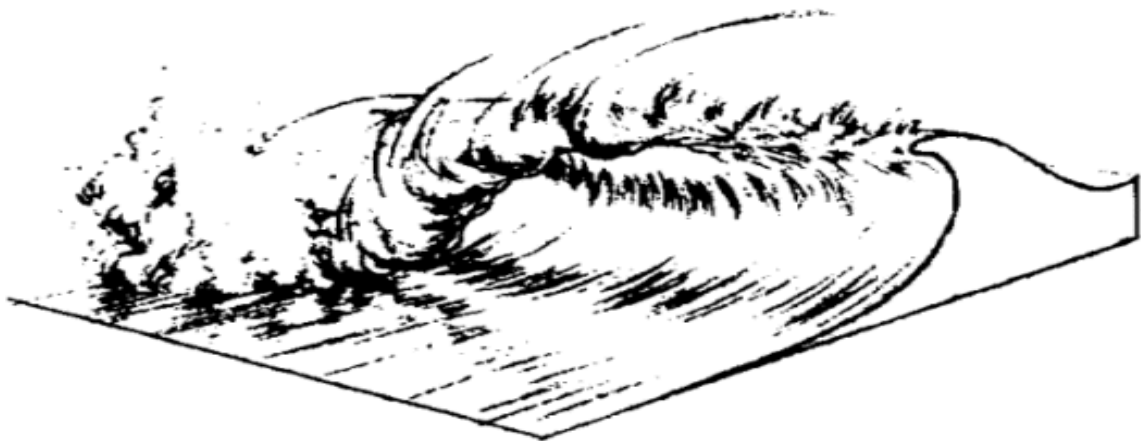


Tableau de Pierre FOREST

II le déferlement

1) les causes du déferlement

Le déferlement est un processus dissipatif de l'énergie qui correspond à la dernière étape de la vie d'une vague et qui a donc le plus souvent lieu à l'approche du rivage. Durant cette phase, la vague subira d'importantes transformations dans son comportement et dans sa structure.



Le déferlement est conditionné par la cambrure qui correspond au rapport de la hauteur de la vague sur sa longueur d'onde:

$$c = \frac{h}{l}$$

$$\tanh = \frac{\sinh}{\cosh}$$

La cambrure augmente au fur et à mesure que la houle se rapproche du rivage, jusqu'à une valeur limite qui précède le déferlement. En effet : $C_{lim} \cong 0,142$ (ou 14%) (**Théorie de Michell**), par grande comme par faible profondeur.

Nous allons voir les différents facteurs qui participent à l'augmentation de cette cambrure à l'approche du rivage et qui auront donc une conséquence directe sur la modification de la structure de la vague.

Etudions tout d'abord l'influence de la remontée du fond marin.

Les vagues générées dans les eaux profondes se déplacent vers la côte et arrivent dans une zone d'eau peu profonde. Elles vont alors « subir » la remontée des fonds.

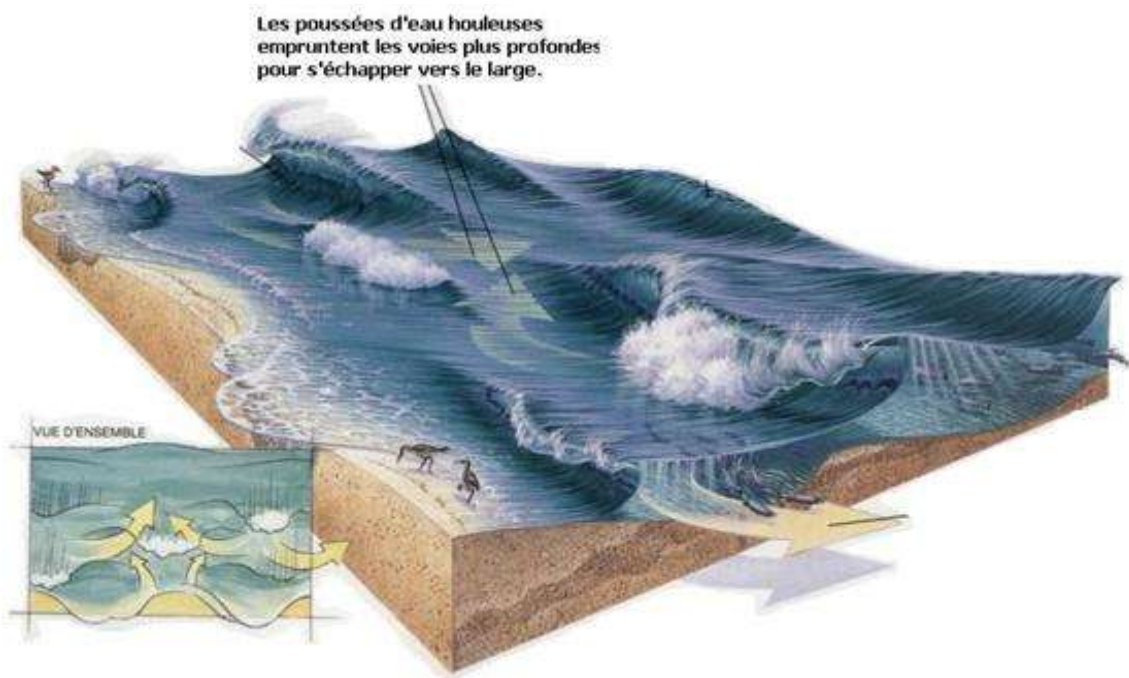
Leur comportement est principalement influencé lorsque la profondeur devient inférieure à la moitié de leur longueur d'onde.

Tout d'abord, lorsqu'une vague approche de la plage, la diminution de la profondeur de l'eau conduit à la réduction de sa longueur d'onde ($L \searrow$).

D'autre part, la diminution du niveau du sol entraîne une hausse de son amplitude qui augmente en même temps que sa hauteur de crête ($H \nearrow$) (en arrivant sur la côte, sa hauteur augmente d'un facteur de 1,5 par rapport à sa hauteur en eau profonde).

Cette augmentation d'amplitude continue jusqu'à une hauteur critique (atteinte environ lorsque la vitesse du fluide en sommet de vague devient égale à la vitesse de l'onde) à partir de laquelle le déferlement débute.

Ces deux phénomènes (augmentation de l'amplitude et diminution de la longueur d'onde) se font simultanément et contribuent, ensemble, à une augmentation irrémédiable de la cambrure (puisque $C = H / L$: $H \nearrow$ et $L \searrow$, donc $C \nearrow$), ce qui obligera une vague à déferler (si le fond continue de remonter, comme c'est le cas d'une plage normale).



Représentation, en perspective, d'un déferlement complexe sur la côte

Le fond marin induit aussi des transformations au niveau des particules d'eau.

Quand la profondeur de la mer devient inférieure à la moitié de la longueur d'onde, un déséquilibre se produit entre la vitesse de l'eau en surface et sur le fond.

Pour simplifier, à l'approche du rivage, les particules d'eau à la base de la houle sont freinées par les forces de frottement exercées par le fond et vont donc moins vite que celles situées en surface (déjà avant d'atteindre les côtes, la houle avait rencontré au large le plateau continental) ; précisons que c'est le fait que les particules en profondeur soient ralenties qui va induire une différence de vitesse entre particules en surface et en profondeur (les particules en surface ne subissent pas d'accélération).

De ce fait, au-delà de la limite de cambrure, la vague se brise, la crête, qui avance plus vite que la base de l'onde, se détache en un jet et tend à s'écrouler dans le creux qui la précède ; la surface de l'eau devient alors un mélange d'eau et d'air : *l'écume*.

A partir de ces explications, on comprend la différence de puissance entre une vague déferlant sur l'île d'Hawaïi, où les fonds marins plongeant abrupts à quelques centaines de mètres du rivage et une vague atteignant notre côte bretonne devant laquelle le plateau continental s'étend en pente douce sur plusieurs dizaines de kilomètres.

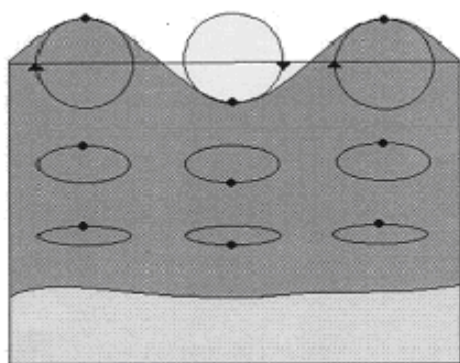
En effet, au moment où la vague de grande longueur d'onde, allant donc très vite, frappe la côte nord d'Hawaïi, la puissance de la vague est quasiment la même qu'en plein océan.

Par contre, une vague de longueur d'onde identique déferlera sur le rivage des plages bretonnes avec beaucoup moins de force car elle aura été freinée par un fond remontant doucement.

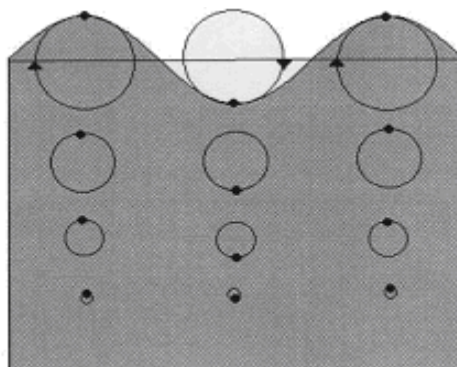
Ainsi le déferlement sera donc plus ou moins puissant selon que la remontée du fond sera soudaine ou progressive.

2) cercles et ellipses

Ainsi, une vague déferle le plus souvent à l'approche de nos côtes parce que le fond marin remonte ; ce fond marin entraîne une dernière modification importante chez la vague : la transformation de la trajectoire des particules, qui est un facteur essentiel du déferlement. Lors du déferlement des vagues, les cercles décrits par les particules d'eau dans l'onde de la houle s'approchent du fond et ces particules d'eau vont alors passer d'un mouvement circulaire en eau profonde à un mouvement elliptique, pour tendre finalement vers un mouvement horizontal.



Trajectoire des particules
à l'approche du rivage



Trajectoire des particules
en eau profonde

De nombreuses explications, plus ou moins complexes et souvent complémentaires, sont données pour comprendre cet « écrasement » de la trajectoire.

Nous nous intéresserons plus particulièrement dans ce TPE à l'aspect énergétique de cette transformation.

La trajectoire circulaire est le « moyen » pour la particule de conserver son énergie.

Or, lors de la remontée des fonds, les forces de frottement évoquées précédemment causent une déperdition d'énergie de la part des particules les plus proches de ce fond. Déjà avant d'atteindre les côtes, la houle avait rencontré au large le plateau continental qui freine sa progression, diminuant ainsi la rapidité et la puissance des vagues.

Ainsi, pour tenter de minimiser ces pertes, la particule d'eau est « contrainte » de modifier sa trajectoire qui deviendra elliptique, pour tendre même à l'horizontal au plus profond.

On peut d'ailleurs observer que les particules les plus en surface (qui sont donc très peu soumises aux forces de frottement) ont toujours la même trajectoire circulaire, que ce soit en eau profonde ou à l'approche de nos côtes. Enfin, outre le fait que le déferlement se « matérialise » par un détachement de la crête de la vague, un mouvement très désordonné des particules d'eau est aussi observable (tellement chaotique et imprévisible que les mouvements de ces milliers de molécules ne peuvent être modélisés) ; par exemple, les trajectoires de deux particules voisines vont finir par se « couper », etc...

3) l'action du vent

Le vent est à l'origine de la houle, mais il joue également un effet local important en influençant le déferlement de la vague.

1. Vent *off-shore* venant de la terre :



Le vent souffle face à la vague. Ce type de brise ordonne la houle, lisse le plan d'eau et retarde le déferlement de la vague, la rendant ainsi plus creuse.

2. Vent *on-shore* venant de la mer :



Le vent souffle derrière la vague. Ainsi, suivant sa force, il provoque le déferlement plus ou moins précoce de la vague. Il est à l'origine du *clapot* et d'un plan d'eau désordonné.

Ainsi, lorsque la vitesse du vent qui engendre les vagues croît, la longueur d'onde et l'amplitude augmentent.

Or au-delà d'un vent de 5m/s, l'amplitude croît plus vite que la longueur d'onde et la cambrure de la vague ($C = H / L$) va augmenter.

Il participe ainsi à l'augmentation de la cambrure de la vague (de manière plus modérée que la remontée des fonds).

4) Une équation régissant le déferlement

Nous avons pu voir que la cambrure limite de la vague est : $C_{lim} \cong 0.142$ (théorie de Michell) ; cette valeur est atteinte pour un certain rapport H/L ; mais on peut la déterminer de façon plus précise grâce à la formule suivante :

$$C'_{lim} = 0.14 \tanh\left(2\pi \frac{d}{L}\right)$$

où d est la profondeur du sol marin et L la longueur d'onde de la vague ; la « tangente hyperbolique » est utilisée dans cette formule ; sa présence s'explique par le fait que certaines équations de modélisation (équations paramétriques) contiennent $\sinh$ et $\cosh$ ($\tanh = \frac{\sinh}{\cosh}$)

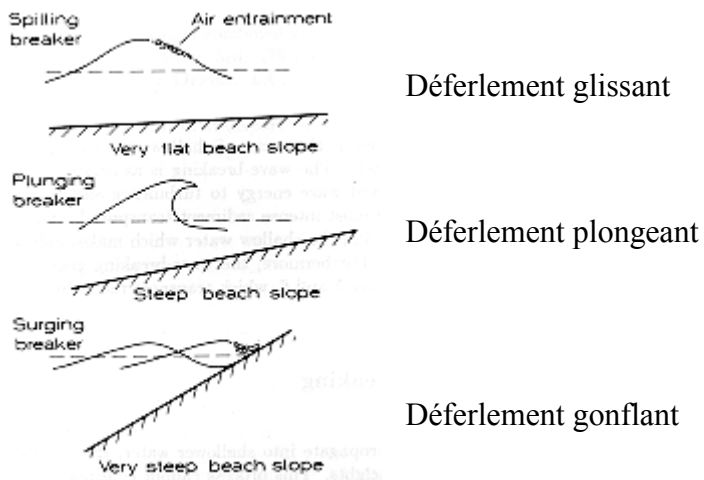
On peut aussi déterminer la cambrure par des moyens « détournés » plus approximatifs mais plus adaptés selon les études menées et les informations dont on dispose.

Par exemple, l'estimation de la hauteur d'eau, importante pour la cambrure de la vague, peut se faire par la relation suivante : hauteur d'eau $\cong 1,5 \times$ la hauteur de la vague en eaux profondes.

5) les différent types de déferlement

Certes le déferlement est une étape obligatoire dans la vie d'une vague, mais ce processus se décline en plusieurs variantes, traduisant ainsi une diversité structure des vagues pour une même étape de sa vie, encore à mettre en relation avec les interactions avec « l'extérieur »

Ainsi, selon la configuration locale du fond, et selon l'action du vent (qui entraîneront des modifications plus ou moins importantes des différents paramètres énoncés précédemment), les vagues se brisent de trois manières différentes que nous présenterons de façon très sommaire.



Le déferlement glissant est caractérisé par de l'écume et de la turbulence au sommet de la vague. Ce phénomène prend naissance avant la côte à cause d'une plus grande vitesse de la lame d'eau de la crête par rapport à la vague elle-même. Un tel déferlement est caractéristique d'un rivage peu pentu. Les frottements ne sont pas assez importants pour créer une véritable différence de vitesse entre le fond et la surface ; la crête ne se détache donc pas.

Le déferlement plongeant, le plus spectaculaire, en forme d'arche, est très prisé par les surfeurs qui tentent de passer dans le tube formé par le jet d'eau qui se retourne. C'est le cas des plages à pente moyenne.

Le déferlement gonflant, brutal, a lieu dans le cas d'une plage de pente assez forte ; puisque la remontée des fonds a été soudaine, la crête n'a pas eu le temps de se détacher quand la vague frappe le rivage.

On peut également subdiviser la zone de déferlement en trois sous- zones :

La Zone de transition (assimilable à la « shoaling zone ») : c'est une zone presque horizontale se trouvant entre la vague non- déferlante et la forme naissante des vagues déferlantes (un peu d'écume sur la crête).

L' « Inner zone » : c'est la zone où le niveau de l'eau monte et où la vague déferle.

La « Swash zone » : c'est la zone proche du niveau moyen de la surface où se situe le mouvement de va-et-vient des vagues.

Ainsi tous les paramètres qui caractérisent la vague vont subir des modifications plus ou moins importantes lors de la phase de déferlement à l'issue de laquelle celle- ci ne sera plus.

La Zone de transition (assimilable à la « shoaling zone ») : c'est une zone presque horizontale se trouvant entre la vague non- déferlante et la forme naissante des vagues déferlantes (un peu d'écume sur la crête).

L' « Inner zone » : c'est la zone où le niveau de l'eau monte et où la vague déferle.

La « Swash zone » : c'est la zone proche du niveau moyen de la surface où se situe le mouvement de va-et-vient des vagues.

Ainsi tous les paramètres qui caractérisent la vague vont subir des modifications plus ou moins importantes lors de la phase de déferlement à l'issue de laquelle celle- ci ne sera plus.

Compte- rendu d'expérience

Voici comment les chercheurs étudient les vagues et tout les phénomènes s'y rattachant :

la meilleure façon de mesurer les caractéristiques de la surface de l'eau est de le faire sans contact. Les chercheur utilisent donc des méthodes de traitement d'image : un appareil prend une photo de la surface de l'eau. L'appareil regarde, pour ainsi dire, depuis le haut à travers la surface de l'eau et vise un motif de couleurs qui est éclairé. Du fait des vagues, les rayons lumineux sont réfléchis et réfractés et différentes couleurs apparaissent. L'analyse colorimétrique leur permet d'en déduire la position et la forme de la vague. Ils peuvent donc étudier la formation des vagues, quelles vagues se forment en fonction de la vitesse du vent, avec quelle fréquence. Une camera infrarouge mesure en permanence les conditions thermiques juste au-dessous de la surface de l'eau ; les scientifiques observent comment se repartit la chaleur en fonction de la vitesse des vagues (zones froides en bleu et zones chaudes en jaune). En effet plus la vitesse de la vague est grande, plus la chaleur est uniforme. Bien sûr, nous ne disposons en rien de cette logistique au lycée, qui de toute façon n'est pas à notre portée ; mais le sujet de notre TPE est propice à des expériences de modélisation simples, permettant de cerner les mécanismes fondamentaux de la propagation des vagues et de voir les changements de structure qui s'opèrent selon les « conditions de vie »

La première expérience a été réalisée en laboratoire car elle nécessite un appareil spécial : la cuve à ondes ; mais la seconde peut très bien être effectuée à la maison car elle ne nécessite aucun matériel spécialisé. Ces expériences ont pour but de faire la relation entre onde et vague

- Expérience de modélisation numéro 1

Lors de cette expérience le problème à étudier est le suivant : y a-t-il un déplacement de matière lors de la propagation de l'onde ?

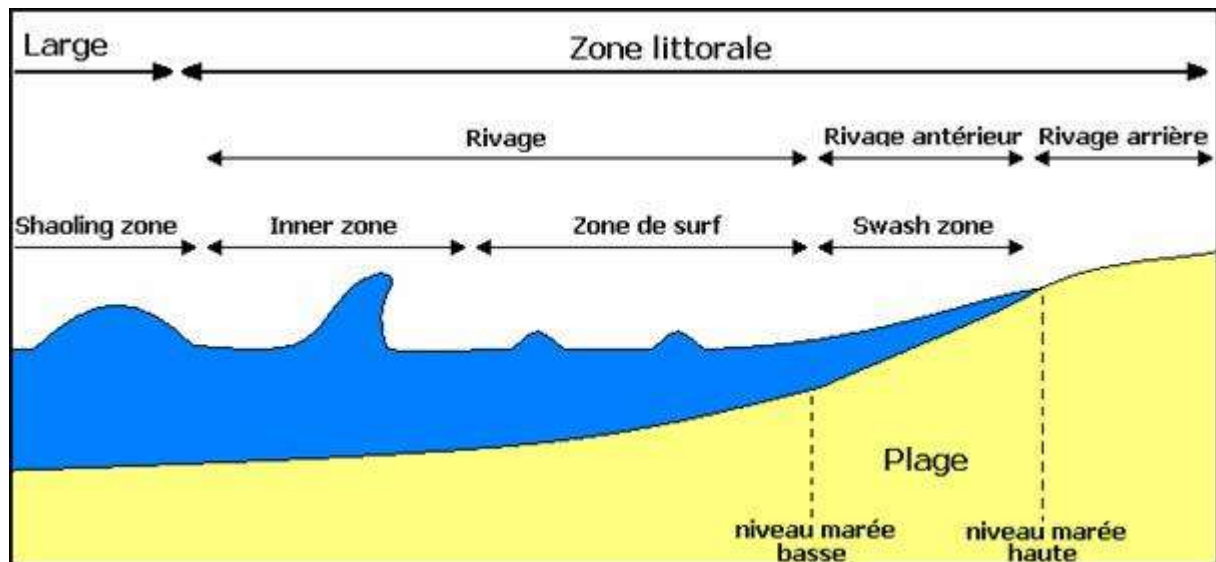
Pour tenter de répondre à cette problématique et s'attacher à démontrer qu'il n'y en a pas (ou très peu) nous allons réaliser l'expérience suivante.

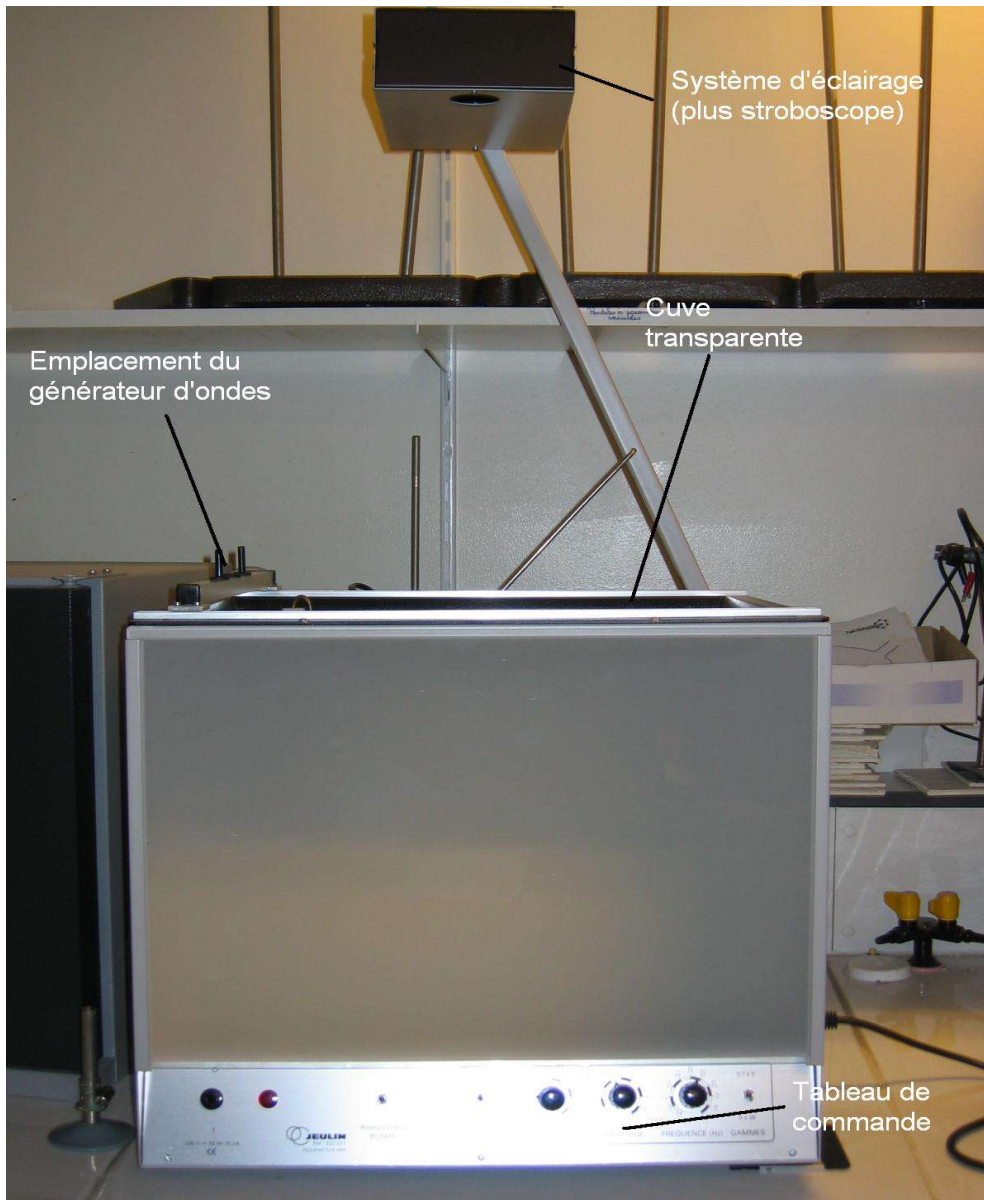
Matériel : Une cuve à onde munie de ses différents accessoires.

De petits objets pouvant flotter (nous avons opté pour des grains de riz).

Différents types de générateur d'onde.

De l'eau.





Cuve à ondes

Principe de fonctionnement : On remplit le haut de la cuve avec de l'eau ; un générateur d'onde est fixé sur l'appareil et on met ensuite en place la source lumineuse (présence aussi d'un stroboscope qui, lorsque sa fréquence est alignée avec la longueur d'onde de la vague permet d'observer certains phénomènes qui seront développés plus bas).

Grâce à la transparence de la cuve en plastique, à l'éclairage et à un ingénieux système de miroirs, nous pouvons visualiser sur l'écran l'onde de la vague (c'est cet écran que nous avons pris en photo)

Sur le tableau de commande, en jouant sur la fréquence du générateur, nous pouvons obtenir différents types d'ondes.

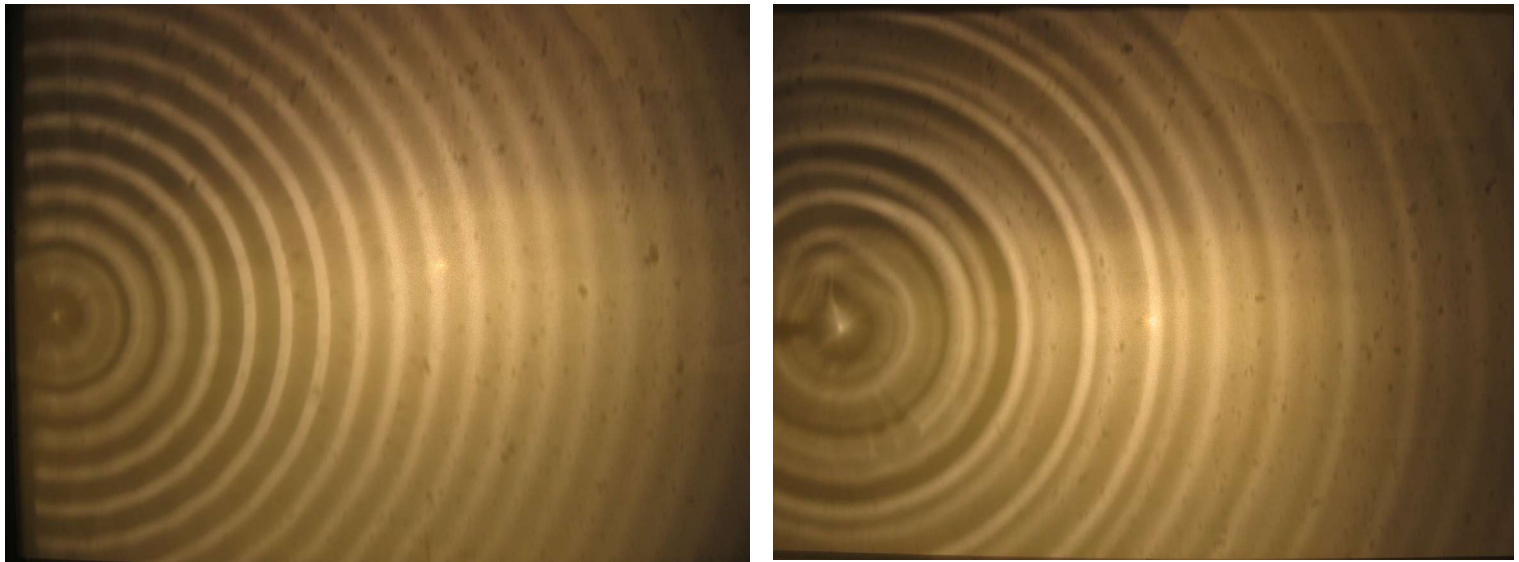
Au début de l'expérience nous avons fixé le générateur d'ondes (le tube coudé) sur la cuve à ondes (car en effet nous disposons de différents types de générateur d'ondes amovibles et de tailles diverses) et nous lui avons imprimé un léger mouvement d'oscillation jusqu'à l'apparition de petites rides à la surface de l'eau (produisant une onde « circulaire » du même type que lorsque l'on jette un caillou dans de l'eau)



Oscillations à la surface de l'eau

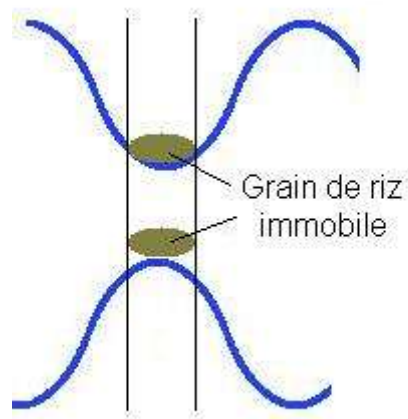
Grâce à un réglage adéquat de l'éclairage et de la fréquence du générateur d'ondes nous avons obtenus sur l'écran une représentation satisfaisante de l'onde

Nous pouvons voir sur ces photos la représentation d'ondes de différente longueur d'onde



Nous nous sommes aussi attachés à montrer que la vague n'est en aucun cas un déplacement de matière mais un déplacement d'onde.

Pour ce, nous avons ainsi posé un grain de riz sur l'eau. On observe que celui-ci flotte et ne se déplace sensiblement pas tandis que l'onde se déplace d'un bout à l'autre de la cuve. (Voir la vidéo)

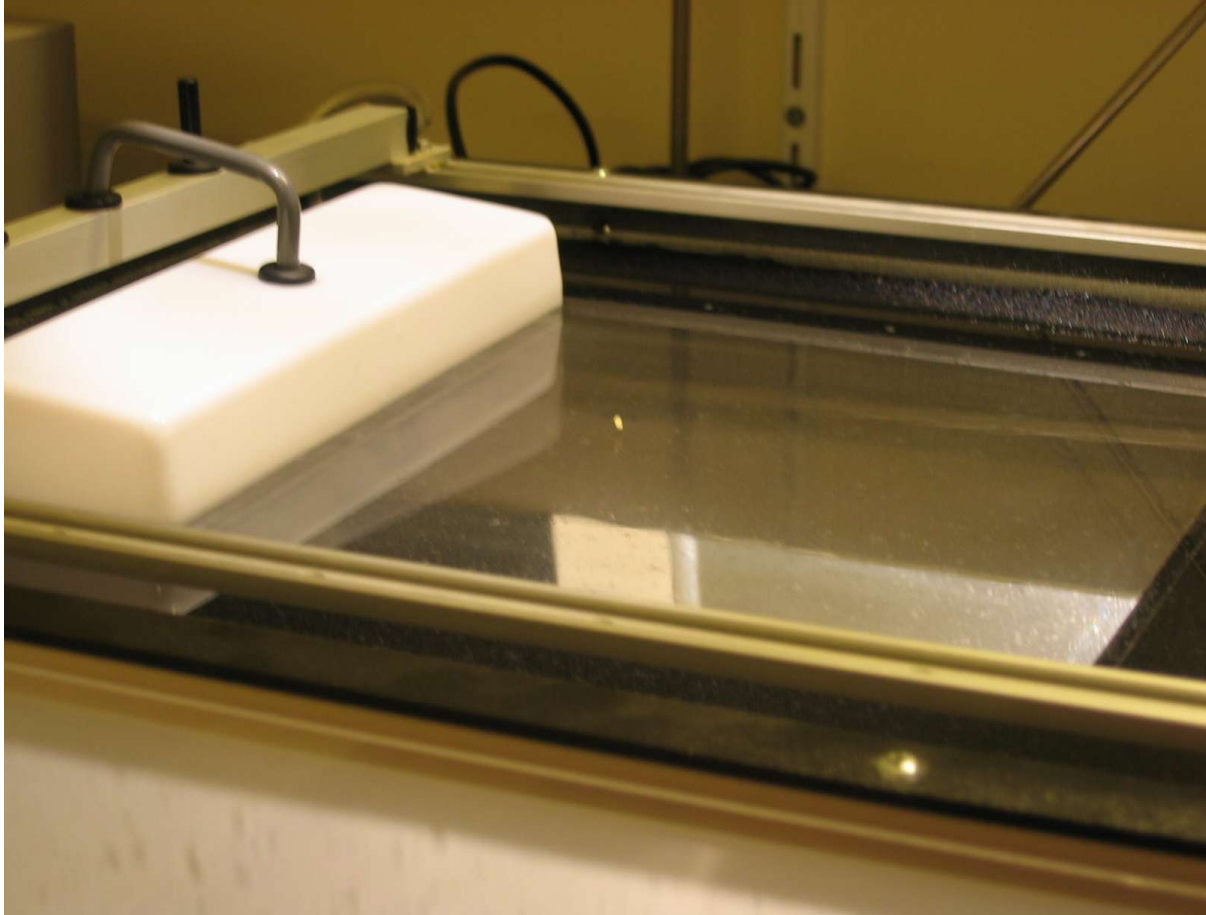


(L'amplitude et la longueur d'onde ont été volontairement exagérées pour bien visualiser le phénomène)

Cependant cette expérience a ses limites : la cuve à onde étant de profondeur très limitée (quelque centimètres tout au plus) elle ne reproduit en rien les conditions réelles de propagation d'une vague, ce qui induit aussi que la structure des ondes présentée est idéale et ne tient pas compte du vent, du fond marin pentu etc..... De plus les ondes générées par le vibreur possèdent une longueur d'onde très faible ce qui n'est pas représentatif de la réalité (c'est une expérience de modélisation).

Après avoir observé la propagation d'une onde mécanique et « prouvé » que le mouvement de matière (outre les particules d'eau) est presque inexistant, nous avons décidé de nous rapprocher du véritable comportement des vagues. Pour parvenir à nos fins, nous avons

rajouté au générateur d'onde coudé un socle de sorte que les ondes produites soient verticales, comme c'est le cas pour une vague.



Montage de la seconde partie de l'expérience

En mettant de nouveau un grain de riz sur l'eau, le résultat est le même : il reste à peu près immobile (le déplacement n'est que vertical).

Ces différentes manipulations nous ont permis de modéliser une petite vague artificiellement ainsi que de nous familiariser avec la notion d'onde ; ainsi une vague est le résultat du déplacement d'une onde selon un mouvement d'oscillation sans aucun déplacement de matière. Nous pouvons maintenant faire l'analogie avec un bateau en pleine mer soumis à une vague, il n'avancera pas si l'action du vent est nul (condition parfaite mais irréalisable en mer) mais il bougera bien en hauteur s'il se situe sur la crête ou dans le creux de la vague.

- Expérience de modélisation numéro 2

Cette seconde expérience permet de déterminer l'action du vent sur la naissance d'une vague et constitue une approche des modifications de structure qu'elle connaît durant les différentes étapes de sa vie (reproduite ici en « miniature » et de façon très approximative)

Matériel : Un récipient transparent de type cristalliseur
Un sèche-cheveux
De l'eau

Matériel de l'expérience

Principe de l'expérience : cette expérience est vraiment simple, mais elle permet de bien visualiser les différentes modifications. On se munit d'un plat transparent que l'on remplit d'eau jusqu'au bord. Ensuite nous faisons varier la puissance de soufflerie d'un sèche-cheveux braqué sur le récipient.

Nous avons filmé l'expérience sous deux angles différents : de plongé pour pouvoir voir l'onde et de profil pour bien visualiser la longueur d'onde et l'amplitude et faire le parallèle avec les schémas proposés.

(Voir les différentes vidéos)

Nous pouvons tout d'abord observer que les vagues naissent sous l'action du vent (modélisé ici par la soufflerie du sèche-cheveux) ; plus on augmente la puissance du sèche-cheveux, plus la structure de la vague s'en voit modifiée. Au contact des bords du plat la vague « déferle » (c'est un déferlement provoqué mais il est à noter que l'on voit apparaître « l'écume » et un mouvement très chaotique de l'eau à cet endroit).

Cette expérience d'analogie permet de comprendre un mécanisme de formation de la vague (et des rides d'oscillations en général) et offre une visualisation de sa naissance progressive avec un changement des paramètres qui la caractérisent (augmentation de la longueur d'onde et de l'amplitude en fonction de la vitesse de la soufflerie). Le récipient étant « petit », nous pouvons aussi visualiser (outre les objectifs du TP) des phénomènes de réflexion de la « houle » sur les bords (analogie avec un récif ou une côte abrupte).

Le phénomène observé aurait été exactement le même avec un récipient de deux mètres de long : dans sa partie centrale (qui n'est plus à portée du sèche-cheveux), on observerait une houle qui n'a plus besoin du vent pour se propager.

Ainsi ces expériences nous ont permis d'avancer dans l'étude de la vague pour en « recréer » en laboratoire et ainsi cerner les principes fondamentaux de sa propagation. Nous avons pu « valider » expérimentalement les différents modèles théoriques et constituer ainsi un complètement à notre étude.



CONCLUSION

Ainsi les vagues connaissent elles aussi une vie divisée en plusieurs étapes bien distinctes, délimitées par la naissance et par la mort.

Ces différentes étapes correspondent à un changement de structure de ces dernières, mais elles correspondent aussi à un changement de leur « milieu de vie » (eau profonde / peu profonde ; surfaces génératrices ; fond marin plus ou moins pentu...), preuve déjà que ces deux réalités sont liées.

Si les modifications de structure opérées sont bien visibles et même identifiables à l'œil nu (le déferlement par exemple), leur explication se fait au niveau microscopique (à travers le mouvement des particules d'eau) mais aussi macroscopique (influence du vent concernant la naissance et le déferlement par exemple).

Ces études théoriques ont été appuyées par des expériences en laboratoire et une modélisation sur « Maple » a aussi montré que ces mécanismes naturels de propagation des vagues sont récupérables dans le domaine mathématique ; mais il faut savoir que, outre la présence de phénomènes complexes qui ne sont pas traités dans notre TPE, d'autres restent encore inexpliqués aujourd'hui ; par exemple, l'effet du vent sur la formation et la croissance des vagues (présente de façon simplifiée) est encore mal connu.

Il faut croire que ces dames capricieuses veulent garder une part de mystère



BIBLIOGRAPHIE

encyclopédies et dictionnaires DICTIONNAIRE ENCYCLOPEDIQUE, quillet,
ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS, Encyclopaedia Universalis, (vagues)
LAROUSSE
LE ROBERT
LES SECRET DE LA TERRE, édition BRGM

sites internet

<http://perso.wanadoo.fr/ps2p/pierre> (09/03/2004)
<http://www.ac-normea.nc/jules-garnier/see/terminales/1999/lebn/vagues.html> (16/03/2004)
<http://www.apere.free.fr/vagues> (02/03/2004)
<http://www.bassin.fr> (16/03/2004)
<http://www.breizsurfing.org> (02/03/2004)
<http://www.bretagnenet.com/bsurfing> (10/04/2004)
<http://www.enseeiht.fr> (10/04/2004)
<http://www.pharocrest.ac-rennes.fr> (30/03/2004)
<http://www.vaubon.eu/opinfo/2000-01/rougier/vvf.htm> (23/03/2004)

cédérom

ENCYCLOPEDIA MICROSOFT ENCARTA 98, microsoft corporation, 2000, (vagues)