

Les états de mer : un état de l'art

le marin, l'océanographe et l'infographiste

Parenthoën M., Gourrion J., Tisseau J.

Laboratoire d'Ingénierie Informatique. ENIB/LI2, CS 73862 F-29238 Brest cedex 3
{parenthoen, gourrion, tisseau}@enib.fr

Résumé : *Cet article dresse un état de l'art des principaux points de vue qui doivent être pris en compte pour une animation interactive temps réel de la mer. Le point de vue des marins nous apprend que la mer est essentiellement un plan d'eau hétérogène où de nombreux éléments naturels (vagues, vents, déferlements, courants, hauts-fonds...) interagissent localement et guident les choix stratégiques des marins. Le point de vue des océanographes distingue deux grands types d'entités énergétiques : les groupes de vagues et les déferlements. Ces deux types d'entités interagissent entre elles et avec l'environnement (vents, courants, hauts-fonds) pour générer un état de mer hétérogène où les différents phénomènes observés par les marins sont expliqués physiquement. Enfin, le point de vue des infographistes repose sur des simplifications des solutions approchées aux équations de Navier-Stokes et cherche un équilibre entre deux grandes approches inspirées d'hypothèses océanographiques : une approche particulière et une approche spectrale. Cependant, aucun modèle actuel d'animation temps réel de la mer ne tient compte simultanément à l'échelle d'un plan d'eau hétérogène d'une dizaine de kilomètre des effets locaux des déferlements, des vents, des courants et de la bathymétrie sur des groupes de vagues, et ce à toutes les échelles de longueur d'onde, phénomènes pourtant essentiels pour que la simulation maritime ait du sens pour les marins et reste physiquement crédible aux yeux des océanographes.*

Mots-clés : états de mer, modèles de mer, animation temps réel, simulation

1 Introduction

L'animation interactive de la mer en temps réel constitue un enjeu stratégique dans de nombreux domaines d'application liés aux différents métiers de la mer. En effet, de plus en plus souvent, les spécialistes de la navigation, de la construction navale, de l'offshore, de la sécurité maritime, de la compétition nautique..., ont recours à la simulation et à la réalité virtuelle mais ne disposent pas de modèles numériques de mer satisfaisants pour leurs études. Les infographistes seront donc amenés à prendre en compte de plus en plus précisément les phénomènes physiques qui rendent compte de la mer telle qu'elle est perçue par ces spécialistes. Dans le cadre de la réalisation d'une mer virtuelle interactive, cet article décrit les repères utilisés par les marins pour "lire" un plan d'eau hétérogène et décider des stratégies de navigation à suivre, réalise une expertise océanographique de ces phénomènes et montre en quoi les principaux modèles actuels d'animation de la mer sont insuffisants pour les marins et les océanographes.

Dans la section 2, nous définissons la notion de plan d'eau et les phénomènes à partir desquels les marins choisissent leurs stratégies de navigation. Le vocabulaire marin permettant la description d'un tel plan d'eau hétérogène est résumé à la fin de cette section dans le tableau de la figure 3, page 3. Nous présentons dans la section 3 les modèles physiques des phénomènes océanographiques décrivant phénoménologiquement les processus qui régissent la formation et la propagation d'un état de mer dans le but de représenter de manière physiquement crédible les phénomènes constitutifs des affordances maritimes. Puis la section 4 passe en revue les principaux modèles d'animation graphique de la mer et met en évidence l'absence de cette notion de plan d'eau dans la plupart des simulateurs actuels. Nous concluons à la section 5 par l'importance du développement d'une animation phénoménologique de la mer pour que l'environnement virtuel de simulation puisse être à la fois conforme aux modèles océanographiques et expérimentable par des marins.

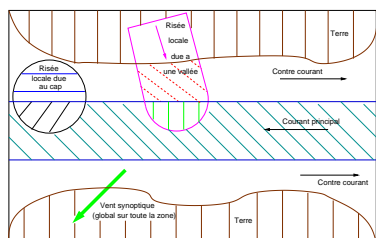
2 La mer des marins

Pour un marin, la mer est tout sauf homogène. Ce n'est pas une simple étendue d'eau avec des vagues. Leurs formes, leurs couleurs, leurs comportements, leurs bruits sont autant d'éléments qui permettent de savoir où aller au plus vite pour continuer à survivre. Dans cette section, nous présentons la notion de plan d'eau telle qu'elle est perçue par les marins, puis nous spécifions un langage métier pour la description de la mer.

2.1 Un plan d'eau hétérogène

La navigation en mer nécessite l'appréciation des éléments naturels (vents, courants...) pour anticiper les trajectoires à faire prendre par le bateau. Cette appréciation est d'autant plus critique qu'elle concerne la navigation à

voile. Pour cela, les skippers doivent en permanence prendre des décisions en fonction bien entendu des conditions météorologiques, des autres bateaux et des amers (bouées et repères à terre), mais surtout en fonction du plan d'eau (figure 1). Les choix de stratégies de navigation sont guidés par les affordances [Gib79] maritimes estimées à partir de ce que l'on peut percevoir sur le plan d'eau : la forme ou le bruit des vagues, leur direction, la présence de déferlements, les risées... Toutes ces caractéristiques définissent ce qu'on appelle un *état de mer*. L'apprentissage de la lecture d'un plan d'eau est primordiale dans la formation des skippers à la navigation [SDT97].



La lecture du plan d'eau est à la base du choix des stratégies de navigation par un marin. Il faut pouvoir y repérer les vents, les risées, les courants, les contre-courants, les hauts-fonds, les barres (zones de gros déferlements)... Ces différents éléments sont identifiables par l'état local de la mer : longueurs d'onde, cambrures, vitesses, moutonnements ou déferlements des vagues. Tous ces éléments ne sont pas directement des affordances, mais ils sont essentiels à leur constitution pour le marin, qui doit d'abord survivre en ne mettant pas son bateau en danger et ensuite aller le plus vite possible en fonction de ses buts, dont le principal est le retour à bon port.

FIG. 1 – Un exemple de plan d'eau hétérogène

Le modèle de mer doit être capable de restituer cette notion de plan d'eau hétérogène sur un horizon d'une dizaine de kilomètres au plus, notamment par des aspects géométriques texturés et sonores afin de pouvoir générer par la suite une immersion au moins visuelle, vestibulaire et auditive permettant la spécification multi-sensorielle des affordances maritimes [Moi71, SB01]. Le modèle pour générer une mer réaliste doit ensuite respecter des contraintes physiques des phénomènes représentés. Par exemple, les vagues se déplacent en groupe. Un groupe de vagues est une unité physique transportant de l'énergie (due à l'action du vent ou d'un bateau) sur l'eau. Le vent influence les vagues. Il peut créer des vagues en fonction de l'étendue de la zone libre de la surface de la mer sur laquelle il souffle, modifier lentement leur forme (*cambrure*, *longueur d'onde*, *avance des crêtes*), ou faire apparaître des irritations à la surface de l'eau (vagues capillaires d'une longueur d'onde inférieure à 3 cm ou *risées*). Les courants et la profondeur d'eau influencent aussi les vagues, en changeant les longueurs d'ondes, la vitesse, la direction de propagation et la cambrure. Et lorsque la cambrure d'une vague est trop élevée, la partie supérieure se détache et l'eau en déferlant crée de la "mousse", on parle alors de moutonnement ou de déferlement selon la quantité de mousse.

Ainsi, vue par les marins, la mer est très hétérogène et c'est sur cette hétérogénéité que les marins s'appuient pour décider des trajectoires à prendre sur le plan d'eau. Pour caractériser un état de mer, ils utilisent un vocabulaire spécifique que nous décrivons maintenant et qui est résumé à la fin de cette section (figure 3 page 3) afin de bien définir quels sont les phénomènes qui doivent être représentés dans un simulateur de mer utilisable par des marins.

2.2 Eléments naturels

Pour décrire la mer, les marins utilisent des termes métier caractérisant les états de mer selon les phénomènes observables. Ce langage de haut niveau permet à des non-informaticiens de contrôler le modèle de mer. Il permet de décrire en peu de mots un plan d'eau non homogène. Par exemple, sur une fiche d'entraînement aux jeux olympiques de Sydney, on peut lire : *Aujourd'hui, houle de sud-ouest 1 mètre, vent force 4 d'ouest présentant des oscillations de $\pm 5^\circ$ toutes les 6 minutes. A 12h30 le courant ne s'était pas inversé* [Iac00]. Nous précisons maintenant comment sont caractérisés les houles, les vents, les courants et les hauts-fonds par les marins. L'ensemble de ces termes marins est récapitulé en fin de section sous la forme d'un tableau dans la figure 3, page 3. Les descriptions et les formules présentées ci-après sont adaptées du site internet de l'Organisation Météorologique Mondiale¹ et du livre de météorologie marine [May92].

La houle. La *houle* est créée par du vent éloigné de la zone d'observation. Elle se déplace en formant des groupes de vagues. Une vague progresse dans le groupe, croît jusqu'à la moitié du groupe, puis décroît jusqu'à l'évanescence à l'avant du groupe, se faisant remplacer à l'arrière du groupe par une nouvelle vague. Le groupe se déplace en eaux profondes deux fois moins vite que les vagues qui le parcourent. Le nombre de vagues par groupe varie classiquement de 3 à 15. Pour un marin, la houle est suffisamment bien caractérisée par sa direction, sa période, sa longueur d'onde, sa hauteur, sa cambrure, son nombre de vagues par groupe et l'étendue des crêtes.

Les vents et la mer de vent. Le vent qui souffle sur un plan d'eau est irrégulier. On distingue les *risées* ou les *rafales*, qui durent quelques secondes et/ou sont localisées sur de petites étendues, du vent *synoptique* qui correspond au vent soufflant globalement au dessus du plan d'eau. Le vent est responsable de la formation des

¹OMM. <http://www.wmo.ch/index-fr.html>

vagues d'origine éolienne (les autres étant dues par exemple aux tremblements de terre ou aux sillages des bateaux). Les marins distinguent la mer de vent de la houle. Contrairement à la houle qui peut venir de loin, la *mer de vent* est le résultat local (en temps et en lieu) de l'effet du vent soufflant sur le plan d'eau. En fonction de la vitesse du vent, de sa durée d'action et du fetch, on peut estimer la période dominante des vagues avec le diagramme empirique présenté sur la figure 2 ; diagramme obtenu d'après les excellents travaux océanographiques de [SM47], réalisés pour le débarquement lors de la deuxième guerre mondiale.

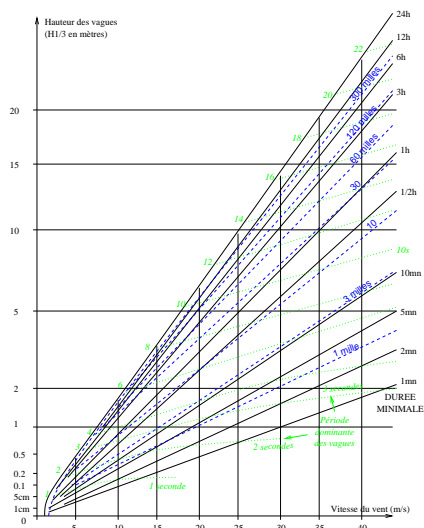


Diagramme obtenu selon [SM47] permettant de connaître la hauteur significative et la période dominante des vagues de la mer de vent en fonction de la vitesse du vent. Prenons par exemple un voilier situé à 3 milles de la côte (1 mille est la longueur d'un arc de grand cercle sur la surface de la terre d'une minute d'angle : 1 mille \approx 1875 mètres), surpris par un coup de vent soufflant à $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ orthogonalement à la côte vers la mer. Au bout d'une minute, les vagues feront 70 cm, au bout de 10 minutes, elles feront 2.5 m et tant que le voilier ne s'éloigne pas de la côte, les vagues ne grossiront pas plus car même si la durée d'action s'accroît, le fetch reste limité. Si le voilier suit le vent (supposé stable pendant 24h et soufflant sur plusieurs centaines de milles), au bout de 24 heures, il sera au moins à 200 milles des côtes avec des vagues de 10 mètres, certaines grosses comme des immeubles de 4 étages : une vague sur 100 faisant plus de 16 mètres. Aucun marin ne souhaite se retrouver dans de telles conditions !

FIG. 2 – Hauteurs significatives des vagues de la mer de vent

Les courants et les hauts-fonds. Lorsqu'un *courant* reconte des vagues de sens opposé, il diminue leurs périodes et leurs longueurs d'onde et augmente leurs hauteurs. Si la vitesse du courant atteint le quart de la vitesse des vagues, leur cambrure s'accroît alors dans des proportions considérables et des barres déferlantes se forment à l'avant de la zone de courant intense. Si au contraire, le courant et les vagues vont dans le même sens, les vagues s'aplatissent, leurs longueurs d'onde et leurs périodes augmentent. Tous les courants locaux ne figurent pas sur les cartes et seule l'expérience maritime permet de reconnaître les indices principalement visuels (formes des vagues, tourbillons, scissions, sillages...) sur le plan d'eau indiquant des lignes de courants et les contre-courants. On parle de *haut-fond* à partir du moment où la profondeur est inférieure à deux fois la longueur d'onde des vagues qui passent au-dessus. En arrivant sur un haut-fond, une vague voit sa hauteur s'accroître, sa longueur d'onde diminuer, mais sa période demeure constante : elle est ralentie par le fond qui s'oppose à son avancée. Bien avant de déferler, les vagues vont avoir tendance à s'orienter parallèlement aux isobathes (ligne de même profondeur). En fonction de la forme du fond, les vagues adoptent un comportement caractéristique. Ces formes sont les dorsales (cap), les gradients divergeants (baie), les vallées (embouchures) et les sommets (récifs, bancs).

terme marin	phénomènes observables	caractéristiques
houle	groupes générés par le synoptique à distance de la zone d'observation, vagues progressant de l'arrière vers l'avant du groupe croissant dans la première moitié puis décroissant dans la seconde.	direction, période, longueur d'onde, hauteur, cambrure, nombre de vagues par groupe, largeur des crêtes.
vent synoptique	système météorologique, fronts, échelle Beaufort (c.f. : OMM ou [May92]).	direction, vitesse, oscillations.
risée ou rafale	système micro-météorologique (cellule convective, relief, état de mer local (irrisation, moutonnement, déferlement, embruns).	localisation, direction, vitesse, durée.
mer de vent	groupes de vagues, développement de l'état de mer, cambrure des vagues selon durée d'action du synoptique et fetch (figure 2).	âge, direction, hauteur et période des vagues dominantes.
courant	barres stationnaires, déferlements ou aplatissement des groupes, translation des vaguelettes, lignes de cisaillement (contre-courant), sillages.	localisation, direction, vitesse, horaire d'inversion et sens de rotation.
haut-fond	cambrure des vagues, déferlements, réfraction des groupes, déviation des courants.	localisation, forme, pente, hauteur d'eau selon la marée.

Ce tableau résume les principaux termes maritimes pour la description d'un plan d'eau. Chaque terme correspond à la désignation d'un phénomène participant aux choix des stratégies de trajectoires en fonction du navire utilisé. Un simulateur de mer, pour être utilisable par des marins, doit représenter dynamiquement, en temps réel et de manière interactive, l'ensemble des phénomènes décrits par ce vocabulaire spécifique.

FIG. 3 – Le point de vue des marins : vocabulaire marin des états de mer et phénomènes correspondants

Dans cette section, nous avons présenté l'importance de la notion de plan d'eau hétérogène pour les marins et le

vocabulaire utilisé pour décrire empiriquement un tel plan d'eau. Les marins observent des phénomènes spécifiques et localisés sur le plan d'eau, sensibles aux effets des vents, des profondeurs et des courants simultanément et qui leur permettent en temps réel de choisir des stratégies de navigation afin de définir les trajectoires à faire suivre au bateau. Ainsi, un simulateur de mer, pour être utilisable par des marins, doit présenter en temps réel et de manière interactive l'ensemble des phénomènes décrits par ce vocabulaire "métier" résumé dans le tableau de la figure 3.

La prochaine section résume la physique de ces phénomènes, en décrivant la manière dont les océanographes expliquent les états de mer.

3 La mer des océanographes

Nous nous proposons, dans cette section, de décrire physiquement les processus de formation d'un état de mer et la manière dont il se propage, en amont des équations de Navier-Stokes [Mil77, Phi77], pour les vagues gravitationnelles² d'une longueur d'onde supérieure à la dizaine de centimètres. D'abord nous aborderons la propagation des vagues d'origine éolienne en introduisant la notion océanographique de groupes de vagues ou trains d'onde, puis nous décrirons comment les vagues se développent en fonction du vent, des courants et de la profondeur. Enfin, nous présenterons comment les déferlements sont modélisés en océanographie physique. Nous concluons sur l'importance de respecter cette expertise physique des comportements d'un groupe de vagues et d'un déferlement en interaction avec leur environnement dans un modèle interactif d'animation phénoménologique de la mer.

3.1 Groupes de vagues

Dans cette sous-section, nous décrivons les preuves expérimentales de l'existence des groupes de vagues et les paramètres qui les caractérisent, puis nous présentons l'ondelette de Morlet 2D comme candidat à la modélisation d'un groupe de vagues, candidat justifié par son utilisation en océanographie pour l'analyse en ondelettes de la surface de la mer.

Résultats expérimentaux et notion de groupe. Il y a un demi-siècle, l'état de mer était déjà analysé comme un processus gaussien sur des groupes caractérisés par l'enveloppe des vagues [LH57], ou comme un processus de Markov générant des groupes de vagues [Saw62]. Les groupes de vagues sont localisés dans le temps et l'espace. Ils sont définis par l'enveloppe des vagues. Ce sont eux qui transportent une partie de l'énergie qui est passée du vent dans la mer. La vitesse de propagation des groupes est plus faible que la vitesse de phase des vagues qui le parcourent. Lorsqu'une vague progresse, elle croît dans la première moitié du groupe : elle gagne en énergie, s'étend en largeur et prend de la hauteur jusqu'à un maximum au centre du groupe. Puis, dans la deuxième moitié, elle décroît et perd progressivement de l'énergie jusqu'à s'évanouir à l'avant du groupe. Une nouvelle vague la remplace alors à l'arrière du groupe. C'est la vitesse de déplacement des groupes qui doit être utilisée pour prédire l'arrivée d'une houle sur la côte [Rob89]. Des mesures effectuées depuis un bateau [LH86] mettent en évidence le fait que chaque groupe est constitué en moyenne de 3 à 15 vagues caractéristiques, mais certains groupes peuvent en avoir 2 alors que d'autres en auront plus de 20.

Si la preuve de l'existence des groupes ne pose plus de problème depuis quelques dizaines d'années maintenant en océanographie, il restait à trouver un formalisme mathématique permettant de les analyser.

Analyse en ondelettes. Tout d'abord mathématiquement, un groupe de vagues est une fonction du type [KCD⁺94] :

$$\zeta(\vec{x}, t) = a(\vec{x}, t)e^{i\chi(\vec{x}, t)} + \text{Cte} \quad \text{où} \quad \chi(\vec{x}, t) = \vec{k}(\vec{x}, t) \cdot \vec{x} - \omega t + \phi(\vec{x}, t) \quad (3.1)$$

présentant une extension finie, *i.e.* son enveloppe a vérifie $a(\vec{x}, t) = 0$ ailleurs que dans un domaine $\Gamma(t)$ fini pour tout t . Il a une position moyenne \vec{X} donnée par :

$$\vec{X}(t) = \int_{\Gamma(t)} \vec{x} a(\vec{x}, t) d\vec{x} \Big/ \int_{\Gamma(t)} a(\vec{x}, t) d\vec{x} \quad (3.2)$$

et cette position moyenne se déplace avec la vitesse de groupe (la moitié de la vitesse de phase en haute mer) :

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \nabla_k \Omega(\vec{K}, \vec{U}(\vec{X}, t), h(\vec{X}, t)), \quad \text{avec} \quad \vec{K} = \vec{k}(\vec{X}, t) \quad (3.3)$$

²L'océanographie propose également un modèle optique empirique de la mer [CM54a, CM54b] pour les vagues capillaires de longueurs d'onde inférieure à la dizaine de centimètres se couplant avec ce modèle gravitationnel, particulièrement intéressant pour modéliser la texture d'un plan d'eau.

où \vec{U} est le courant, h la profondeur, \vec{K} le vecteur d'onde moyen du groupe et Ω la pulsation moyenne du groupe. La trajectoire d'un groupe, définie par ces deux dernières équations, s'appelle un rai. Les groupes se propagent le long de ces rais, et l'on peut résumer l'évolution de la fonction de phase par les équations dites "eikoniales" :

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \nabla_k \Omega \quad \text{et} \quad \frac{d\vec{K}}{dt} = -\nabla_x \Omega \quad (3.4)$$

qui, par le remplacement $(p, q, H) \rightarrow (K, X, \Omega)$, correspondent aux équations de Hamilton en mécanique classique [LL60]. L'exemple le plus simple du comportement d'un groupe de vagues est obtenue en considérant des vagues linéaires (de faible amplitude) par profondeur constante et sans courant. Dans ce cas, $d\vec{K}/dt = 0$ et $d\vec{X}/dt = \vec{C}te$. La forme de l'enveloppe est constante et cette dernière se translate à la vitesse constante $d\vec{X}/dt$.

L'analyse de Fourier est largement utilisée pour analyser les états de mer [Mil57, Phi58, Has62, PM64, Tol89] ; cependant la transformée de Fourier du signal est incapable de localiser les portions du signal dans lesquelles les variations sont rapides, ni celles où elles sont lentes. Cette absence de localisation empêche d'utiliser directement la transformée de Fourier pour modéliser des groupes de vagues, surtout si le milieu est hétérogène [KCD⁺94].

L'analyse par ondelettes est basée sur un concept un peu différent du concept de fréquence : le concept d'échelle [GM84]. Les ondelettes sont des copies d'une même ondelette, dite *ondelette mère*, à la manière des objets fractals [Man75]. La figure 4 présente la mise en évidence de groupes de vagues par une décomposition en ondelettes³ sur des signaux réels enregistrés en Mer Méditerranée par une bouée à 55km au large de Marseille par mistral.

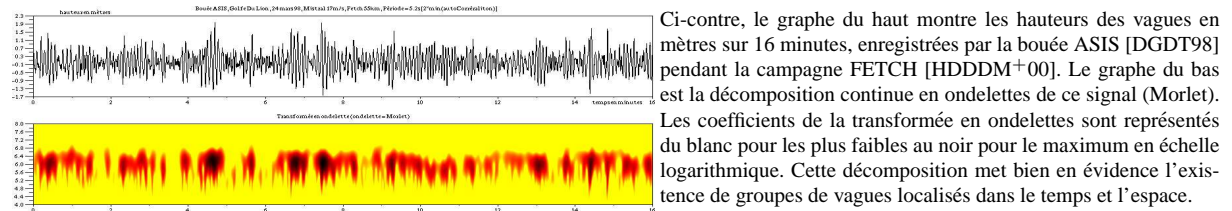


FIG. 4 – Groupes de vagues révélés par une décomposition en ondelettes

Le choix de l'ondelette mère dépend du type de problème que l'on souhaite analyser : la fonction "chapeau mexicain" est bien adaptée aux problèmes isotropiques, alors que la fonction de Morlet 2D (une nappe sinusoïdale enveloppée dans une gaussienne illustrée sur la figure 5) permet de mieux approcher les problèmes non isotropes grâce à l'orientation de la nappe sinusoïdale [AAB⁺95]. La transformée en ondelettes a été utilisée pour analyser des signaux de la surface de la mer [CLPMC95, PLPMC95] ou pour l'analyse des groupes de vagues générés par le vent [DD96] et l'ondelette mère utilisée était l'ondelette de Morlet 2D.

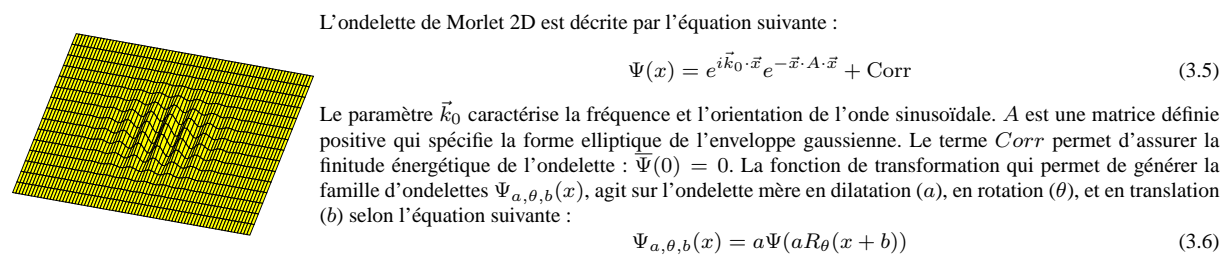


FIG. 5 – Ondelette mère de Morlet 2D utilisée en océanographie

Ainsi, les groupes de vagues sont des entités énergétiques physiques, mises en évidence expérimentalement lors de mesures réalisées en mer. En haute mer, les groupes se déplacent deux fois moins vite que les vagues qui le parcourent. L'analyse en ondelettes (Morlet 2D) est l'un des outils mathématiques utilisés en océanographie pour la description et l'étude des états de mer où l'on cherche à localiser la répartition spectrale énergétique des vagues.

3.2 Dynamique des états de mer

Nous décrivons dans cette sous-section les phénomènes physiques déterminant le comportement d'un groupe de vagues. Nous précisons la genèse, la croissance et la propagation des groupes d'origine éolienne. Puis nous

³Calculs réalisés et graphique obtenu avec la contribution *fractalab* du logiciel "Scilab" développé à l'INRIA. <http://scilabsoft.inria.fr/>

détaillons les effets de la bathymétrie et des courants et caractérisons les déferlements.

3.2.1 Génèse, croissance et propagation des vagues d'origine éolienne

L'analyse des états de mer admet en général la distinction entre deux types de vagues [KCD⁺94] : les vagues de vent, générées et amplifiées par le vent local (*génèse et croissance*) ; la houle résiduelle après un changement de vent ou propagée jusqu'au point d'observation depuis sa zone de génération plus ou moins distante (*propagation*). Les observations de vagues montrent qu'avec l'augmentation du fetch les vagues dominantes s'allongent et perdent de leur cambrure ; elles se propagent plus rapidement et sont relativement moins forcées par le vent [Mit68, Mit69].

Mers jeunes : interactions groupe/vent. Les lois empiriques d'évolution des états de mer [SM47] décrivent les hauteurs et périodes significatives des vagues en fonction de la vitesse, de la durée et de la distance d'action du vent ou *fetch* (figure 2, page 3). Pour les états de mer intensément forcés par le vent, dits *mers jeunes*, il est possible que le déferlement fréquent des vagues ait un impact important sur leur allongement progressif [BT98]. Un paramètre caractéristique du développement d'un groupe de vagues est bien souvent décrit par l'âge α des vagues, défini par le quotient :

$$\alpha = \frac{c}{u_*}, \quad u_* = \tau^{1/2}, \quad \text{avec } \tau = v_a \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{(u', v', w')^2} \quad (3.7)$$

où c est la vitesse de phase des vagues considérées, u_* la vitesse de friction caractéristique du forçage effectif du vent et τ le stress, avec v_a la viscosité cinématique moléculaire de l'air, u la composante horizontale de la vitesse du vent et z l'altitude : le premier terme traduit ainsi les effets moléculaires ; $\overline{(u', v', w')^2}$ est la moyenne des fluctuations de la vitesse du vent qui décrit le transfert des moments de l'air vers l'eau dus aux fluctuations du vent. Une mer jeune aura un âge de l'ordre de 5 à 10, tandis qu'une mer vieille aura un âge de l'ordre de 25 [Jan94].

Mers vieilles : interactions groupe/groupe. Il existe deux phénomènes principaux considérés pour l'interaction entre groupes expliquant l'allongement des vagues pour les états de mer modérément forcés par le vent, ou *mers vieilles* : les résonances et la cinématique.

Depuis les travaux d'Hasselmann [Has62] et les résultats de la campagne JONSWAP [HBB⁺73], l'évolution des champs de vagues de gravité au cours de leur propagation est bien souvent expliquée par des interactions non-linéaires de quadruplets de vagues vérifiant la condition de résonance suivante [BS66] :

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 = \vec{k}_4 \quad \text{et} \quad \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 = \omega_4 \quad (3.8)$$

où les \vec{k}_j et ω_j sont les vecteurs d'onde et pulsations de chaque groupe en interaction. Avec une approximation de faible cambrure, ce mécanisme⁴ peut être décrit par un flux spectral conservatif d'énergie dont le maximum est localisé à des échelles légèrement supérieures à celle des vagues les plus énergétiques [HH85, HHAB85].

L'autre phénomène physique pour l'interaction groupe/groupe s'explique par des considérations cinématiques [BP74]. Lorsqu'un groupe de grande longueur d'onde passe sous un groupe de petite longueur d'onde, ce dernier est alors fortement comprimé sur les crêtes des grandes vagues, et étiré dans les creux. La compression sur les crêtes peut être telle que le petit groupe se met à déferler. Ces déferlements seraient à l'origine d'un transfert d'action des petits groupes vers le grand groupe et pourraient expliquer l'allongement progressif des vagues.

Ainsi, il apparaît que les mécanismes d'interaction dominants expliquant l'allongement des vagues peuvent varier selon le développement du champ de vagues, celui-ci étant bien souvent décrit par l'âge des vagues. La nature sporadique observée du déferlement suggère qu'au sein d'un champ de vagues jeunes, l'amplitude des vagues varie plus rapidement, *i.e.* sur une distance plus faible, que pour des vagues plus vieilles : le facteur de modulation par le vent est plus important et le nombre de vagues par groupe plus faible [DY94].

3.2.2 Interactions avec le courant et la bathymétrie

On focalise ici sur les interactions vagues/courants et vagues/bathymétrie. En négligeant les effets d'atténuation visqueuse et les déferlements, on peut étudier l'évolution des caractéristiques d'un groupe de vagues par les mécanismes de propagation d'ondes libres. Si l'onde est déformée au cours de son interaction avec l'environnement, il n'y a cependant aucune création ou disparition de crête de vague [Phi77]. On obtient alors la loi de conservation des crêtes, où n est la fréquence apparente d'une vague :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_x n = 0 \quad (3.9)$$

⁴C'est ce mécanisme qui est aujourd'hui implémenté dans les différents modèles opérationnels de prévision des états de mer pour décrire l'allongement progressif des vagues (WAM au Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme [Wam⁺88], WAVEWATCH au Centre Météorologique Américain [Tol89], CREST pour la Marine Française [Ard01]).

Bathymétrie. Lorsque la profondeur h n'est plus assez grande, le fond oblige les particules à se déplacer parallèlement au sol et les frottements sont plus forts. Cela a comme conséquence de ralentir la progression des vagues. La période demeurant constante en l'absence de courant, les longueurs d'onde diminuent. Aussi, les vecteurs d'onde moyens vont s'orienter parallèlement au gradient de profondeur : par exemple, si la profondeur est plus faible à gauche du groupe qu'à droite, la partie gauche du groupe sera plus ralentie et le groupe tournera globalement à gauche [KCD⁺94]. Aussi, la divergence (resp. convergence) des gradients bathymétriques peut élargir (resp. rétrécir) un groupe. La quantification de ces phénomènes est déterminée selon la relation de dispersion des ondes de gravité :

$$\omega^2 = gk \tanh(kh), \text{ ou encore : } \left(\frac{\partial \chi}{\partial t} \right)^2 - g|\nabla_x \chi| \tanh(|\nabla_x \chi|h) = 0. \quad (3.10)$$

Cette relation exprime que la période est reliée à la longueur d'onde en fonction de la profondeur ; établie pour le mode irrotationnel, elle reste valable pour les vagues de Gerstner [Ger04, Lam32], modèle largement utilisé en informatique graphique pour l'animation de la mer [FR86].

Courant. Lorsqu'un groupe se propage dans un milieu présentant des variations de courant, il voit sa période apparente modifiée : si le courant s'oppose au sens de déplacement du groupe, le courant va concentrer l'action du groupe dans une plus petite surface, la période augmente, la longueur d'onde diminue et l'amplitude s'accroît ; si le courant va dans le même sens que le groupe, le courant diluera l'action sur une plus grande étendue, la période diminue, la longueur d'onde augmente et l'amplitude décroît. Aussi, les gradients de courant peuvent faire des effets de réfraction ou de divergence. Si le courant n'est pas constant latéralement à un groupe, il peut faire tourner celui-ci ou modifier sa largeur. Pour un milieu animé d'un champ de vitesse $\vec{U}(\vec{x}, t)$, la fréquence apparente n d'une vague est modifiée de la façon suivante : $n = \omega + \vec{k} \cdot \vec{U}$. Lorsqu'un groupe de vagues se déplace dans un milieu en mouvement, la grandeur dynamique conservée au cours de l'interaction onde/courant est l'action totale sur tout le groupe de vagues : $A = E/\omega$, où E est l'énergie totale du groupe [BG69]. En notant $\bar{\mathcal{E}} = 2|a(\vec{x}, t)|^2$ la densité moyenne d'énergie par unité de surface on obtient la loi de la conservation d'action :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\bar{\mathcal{E}}}{\omega} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{\mathcal{E}}}{\omega} \right) + \nabla_x \cdot \left[(U + c_g) \frac{\bar{\mathcal{E}}}{\omega} \right] = 0, \quad \frac{E}{\omega} = c^{te} \quad \text{pour un groupe de vagues donné} \quad (3.11)$$

où c_g est la vitesse de groupe. Cette loi exprime la conservation globale de l'action sous la forme d'un changement local de la densité d'action déterminée par un flux de cette même densité.

Ainsi, pour les vieux groupes non déferlants, en accord avec les descriptions des marins, l'interaction d'un groupe avec son environnement caractérisé par des changements de bathymétrie ou de courant, est quantifiable par des modifications du vecteur d'onde, de la phase, de la pulsation et de l'amplitude des vagues du groupe.

3.2.3 Les déferlements

La dissipation des vagues par le déferlement est l'un des processus les moins bien compris en physique, de par sa nature fortement intermittente [DY94] et de par l'importance prédominante des termes non-linéaires dans les équations de Navier-Stokes, même simplifiées par les équations d'Euler en négligeant la viscosité [GGD01]. Lorsqu'on modélise une vague avec les équations d'Euler, on trouve que la pente maximale d'une vague est de 60° et que sa hauteur maximale est environ 14% de sa longueur d'onde, avant déferlement. Or, on trouve expérimentalement dans des canaux à houle, des pentes maximales de 14° et des hauteurs maximales de 6% [RM90] : les vagues déferlent bien avant d'atteindre la hauteur maximale permise par les équations de l'hydrodynamique. On ignore encore aujourd'hui pourquoi ; mais heureusement pour les marins, les vagues ne grossissent pas comme les équations les modélisent. Lors d'un déferlement, un transfert d'action systématique s'effectue du vent vers les courants, par la médiation des vagues ; ce mécanisme est responsable des grands courants océaniques. Un déferlement provient de l'écroulement locale d'une crête devenue trop cambrée qui peut partir en avant de la crête et tombe sous l'effet de la pesanteur, ou glisse à l'avant de la crête. Il forme un plasma d'air et d'eau : la mousse ; c'est la *phase active* du déferlement. Cette mousse perdure après la phase active de déferlement, et les turbulences locales vont modifier le comportement des vagues suivantes : c'est la *phase passive* du déferlement à l'arrière de la crête.

Phase active. Des critères phénoménologiques du déferlement (vitesse ou accélération critiques de particules, limitation d'amplitude de la vague déferlante) sont fournis par [LH69, Dun81]. Le système vagues/courant échange de l'énergie avec l'écoulement d'air et les couches plus profondes de l'océan : il n'est plus conservatif. D'un point de vue dynamique, il est donc nécessaire de prendre en compte ces nouvelles interactions et de modifier l'équation

dynamique (3.11) en conséquence : même lors des déferlements l'action totale est toujours conservée, mais une partie de l'action est prise par le déferlement [LH69, Whi74, DY94, LPCMC95].

Phase passive. La mousse perdue après la phase active de déferlement et va disparaître progressivement par un phénomène de relaxation des turbulences selon une exponentielle décroissante [Sha95]. Les déferlements passifs des grosses vagues créent une atténuation rapide des vagues courtes arrivant dans ces turbulences [BJT89]. L'effet local d'un déferlement passif important en absorbant les hautes fréquences, est de diminuer temporairement les chances de l'arrivée d'un nouveau déferlement au même endroit, car l'absence locale des hautes fréquences fait que les vagues sont plus arrondies [RC03]. Pour caractériser la représentation de cette mousse au cours d'un déferlement et ses effets sur les groupes, nous pouvons quantifier son étendue en surface pour connaître la zone d'influence du déferlement [Phi85, MM02], et en profondeur pour déterminer d'une part le taux de transparence de cette mousse [MZ69, RC03] et d'autre part quelles vagues seront dissipées par les turbulences [DY94, Wam⁺88].

Ainsi, à partir d'une description initiale phénoménologique, les équations de conservation d'action permettent de quantifier l'importance du déferlement actif d'une vague dans un groupe et de caractériser la durée de ses effets passifs, que ce soit en pleine mer ou près des côtes.

Dans cette section, nous avons présenté la mer vue par les océanographes, dans le but de modéliser les phénomènes observés par les marins (figure 3, page 3). En dehors du vent, des courants et du sol que nous n'avons pas étudiés en tant que tels, on a distingué principalement deux types d'entités énergétiques en océanographie : les groupes de vagues, stables, qui se propagent sur de grandes distances en interaction avec leur environnement, et les déferlements, instables et quasi-immobiles relativement à l'eau, qui se dissipent rapidement vers de très faibles courants de surface, après une courte période transitoire très turbulente. Ces deux types d'entités interagissent entre elles et avec l'environnement (vent, courant, profondeur) pour générer un état de mer hétérogène où les différents phénomènes observés par les marins sont expliqués physiquement, et l'on dispose de formules théoriques et/ou empiriques permettant de quantifier les modifications des caractéristiques ondulatoires des groupes et les échanges d'action entre les groupes, le vent, la bathymétrie, les courants et les déferlements. Cette expertise met en évidence le fait que la modélisation océanographique des états de mer est la superposition de plusieurs modèles physiques de phénomènes considérés indépendamment les uns des autres.

La section suivante étudie la manière dont la notion de plan d'eau interactif hétérogène est abordée dans le domaine de l'informatique graphique, en passant en revue les différents modèles d'animation de la mer.

4 La mer des infographistes

Les modèles graphiques actuels pour l'animation interactive et temps réel de la mer sont basés sur la simplification des solutions approchées aux équations de Navier-Stokes, selon diverses hypothèses physiques, dans un but de photo-réalisme [AM02]. Ces équations de Navier-Stokes n'ont en effet pas de solutions explicites dans le cas général, la complexité algorithmique de leur résolution numérique directe ne permet pas l'animation temps réel d'un plan d'eau de plusieurs kilomètres de rayon et le but des algorithmes de résolution numérique des équations différentielles n'est pas l'interactivité : il faut prédéfinir les conditions aux limites avant d'exécuter les calculs [Tem84, Lia99]. Pour l'animation d'un plan d'eau étendu sur plusieurs kilomètres de rayon comme la mer, on trouve principalement deux grandes approches inspirées d'hypothèses océanographiques sur le problème de Stokes : l'approche particulière s'inspirant de [Ger04] et [Bie52], et l'approche spectrale à partir des travaux de [Has62]. Quelle que soit l'approche graphique de l'animation de la mer, une grille géométrique de points représentant la surface du plan d'eau est mise en mouvement. Les manières de réaliser les calculs des mouvements des points de cette grille dépendent de l'approche considérée et sont précisées dans les sous-sections 4.1 et 4.2. Les approches plus récentes sont décrites dans la sous-section 4.3.

4.1 Approche particulière

L'approche particulière considère les points de la grille géométrique comme des particules d'eau. Le mouvement de chaque point correspond au mouvement d'un bouchon posé sur l'eau possédant au repos les mêmes coordonnées que ce point. L'animation graphique de la mer s'est tout d'abord inspirée du modèle de Gerstner avec les travaux de [FR86, Pea86]. En profondeur infinie, lorsqu'une onde anime la surface, chaque particule décrit un cercle autour d'une position de repos ; la position sur le cercle étant déphasée proportionnellement à la distance entre les deux points, on obtient alors une nappe trochoïdale. Cette solution est alors modifiée pour tenir compte d'effets supplémentaires comme le vent provoquant l'avance des crêtes ou la profondeur modifiant la propagation de la houle selon les travaux océanographiques de [Bie52] : par faible profondeur, un phénomène de réfraction raccourcit la longueur d'onde et les orbites circulaires deviennent progressivement elliptiques avec un grand axe tendant à

s'orienter parallèlement au sol. Les calculs à réaliser pour l'animation de la mer consistent alors à résoudre la direction de propagation et les phases de chaque onde sur toute la surface, les effets de chaque onde s'ajoutant, en première approximation, de manière linéaire au niveau de chaque particule animée. Les déferlements sont générés si la vitesse de la particule dépasse la vitesse de phase de l'onde qui la déplace. La mousse résultante peut être représentée par un système de particules [LP95, Gar97]. La complexité numérique du calcul des effets de bathymétrie sur tout le plan d'eau [équation (3.10)] fait qu'une ou deux houles distinctes seulement peuvent être simulées et elle recouvrent l'ensemble du plan d'eau par des lignes de crêtes homogènes [Pea86]. Afin de rompre cette monotonie des crêtes, [FR86] a introduit la notion de train d'ondes caractérisé par un modèle descriptif de son enveloppe et de sa vitesse de groupe. Quelques modèles comme [TB87] s'efforcent de résoudre précisément la réfraction de la houle en suivant les vagues (*wave tracing*). Mais la grande quantité de calculs toujours nécessaires à cette approche différentielle globale, oblige de limiter le nombre de houles animant la mer en temps réel, à une ou deux périodes et directions principales distinctes pour lesquelles les effets de la bathymétrie sont précalculés en des plans de vagues fonctions de la direction et de la période de la houle [GS00, JBS03]. Afin d'éviter la régularité dans l'alignement des crêtes de ces houles, du bruit est ajouté dans tous ces modèles graphiques tant au niveau de la phase qu'au niveau de la hauteur des vagues. Quant aux vagues de plus petites échelles, elles sont modélisées au niveau de la texture par application d'un bruit de Perlin modifiant le rendu en perturbant la normale [Per85].

Ainsi, ces travaux inspirés de l'approche particulière en océanographie pour la résolution des équations d'Euler pour la surface de la mer donnent accès au mouvement des particules d'eau et sont donc particulièrement intéressants lorsqu'il s'agira, par exemple, de calculer les effets des vagues sur des bateaux ou des infrastructures [CGG03]. Les modèles graphiques particuliers permettent l'animation temps réel d'une houle principale pouvant être très cambrée, déformée par la bathymétrie jusqu'au déferlement. Si l'on veut tenir compte de plusieurs houles en interaction avec la profondeur, la complexité numérique ne permet plus le calcul en temps réel, même sans tenir compte des interactions non-linéaires entre les différentes houles. Aussi, les informations bathymétriques ne sont pas dynamiques, alors que la modification de la hauteur d'eau selon l'heure de la marée peut être critique pour une expérience virtuelle d'une vingtaine de minutes et doit pouvoir se traduire sur le comportement des vagues. Ces modèles graphiques ne prennent pas en compte les effets de courants ou de vents locaux. Lorsque la cambrure est faible ($kr \ll 1$), les trochoïdes peuvent être approchées par des sinusoides, qui sont les primitives de l'approche spectrale.

4.2 Approche spectrale

L'approche spectrale considère les points de la grille géométrique comme des hauteurs d'eau au-dessus de positions au sol. Le mouvement de chaque point correspond aux variations verticales de la quantité d'eau au dessus d'un caillou posé sur le fond ayant les coordonnées de ce point. En faisant une approximation linéaire dans les équations de Navier-Stokes valable pour les vagues de faible cambrure, et en traitant l'eau comme un fluide non visqueux et incompressible, on obtient les équations d'Euler admettant comme solution générale une nappe sinusoidale : $z = W(x, y, t)$, présentant des fréquences spatiale et temporelle. Ces différentes nappes se superposent linéairement, toujours selon l'approximation de faible cambrure pour donner l'altitude z comme fonction de la position et du temps. Cette technique à base de cartes altimétriques permet d'animer une mer calme [Max81], en considérant les vagues comme une superposition de plusieurs sinusoides de faible amplitude. Chaque nappe sinusoidale possède une fréquence spatiale, et la somme résultante présente un spectre dépendant des coefficients et des fréquences utilisées. L'approche spectrale pour l'animation de la mer consiste à utiliser les connaissances océanographiques pour déterminer le choix des coefficients pour chaque fréquence. La rapidité des algorithmes de transformation inverse de Fourier permettent aujourd'hui des calculs efficaces pour générer une image à partir de l'espace spectral. Inspiré des techniques de génération d'images naturelles fractales par le filtrage de bruit blanc par un filtre en $1/f$, [MWM87] a développé une méthode permettant de représenter des vagues en haute mer avec l'aide des travaux océanographiques issus de l'analyse spectrale de mesures réelles de la mer [Has62]. L'idée ici est de projeter une image de bruit blanc dans l'espace des fréquences par transformée de Fourier rapide (FFT), lui appliquer un filtre océanographique modélisant le spectre des fréquences d'un état de mer complètement développée [PM64], puis obtenir l'image résultante par transformée de Fourier inverse (FFT^{-1}). La surface ainsi obtenue présente de nombreuses vagues de fréquences variées, réparties selon le modèle physique à spectre gaussien des états de mer complètement développée, et peut être animée selon une adaptation de la relation de dispersion en profondeur infinie ($\omega^2 = gk$) aux contraintes informatiques [PA01]. On peut aussi modifier le filtre [Tes01] ou ajouter un déplacement horizontal [JG01] afin d'obtenir des vagues un peu plus cambrées s'approchant des trochoïdes. Ces méthodes à base de transformées de Fourier avec filtre océanographique ont été utilisées avec succès pour animer les mers virtuelles dans des classiques du cinéma comme le *Titanic*. Cependant, la méthode génère une mer homogène sur toute l'étendue de la simulation et ne permet pas de modéliser des mers jeunes.

Ainsi, l'approche spectrale, en générant des états de mer présentant des spectres correspondant à un modèle océanographique, permet d'obtenir une animation réaliste de la mer du large pour les états de mer calmes. Cependant, même sans utiliser les propriétés de périodicité permettant pourtant plus facilement une animation temps réel, l'aspect de la mer obtenue par cette technique et vue par un marin est trop homogène. Aussi, il est extrêmement difficile de réaliser en temps réel des calculs dans l'espace spectral afin de tenir compte de la bathymétrie, d'autant plus si la bathymétrie évolue dynamiquement. Les effets locaux des vents et des courants sont ignorés.

4.3 Autres approches

Chacune des approches précédentes possède ses avantages et ses inconvénients. En utilisant le bon modèle en fonction de ses performances et en permettant la cohabitation de plusieurs modèles, l'animation temps réel de la mer devient de plus en plus interactive. Aussi, les nouvelles possibilités offertes par les cartes graphiques modernes permettent de réaliser le rendu en temps réel [Lov03]. Ces deux approches ont été combinées en utilisant des trochoïdes uniquement pour les grandes longueurs d'onde dans un spectre océanographique [TDG00] et la grille géométrique s'adapte aux niveaux de détails selon le point de vue [HNC02]. Exceptionnellement, des travaux combinent l'animation en haute mer avec des effets précalculés de la bathymétrie près des côtes [GS00, CGG01] et seul le studio de développement de jeux Nadeo⁵ aborde la notion de plan d'eau hétérogène avec son jeu *Virtual Skipper*⁶ en y représentant des vents locaux par application de texture et la bathymétrie par des effets de transparence. L'interactivité temps réel avec les modèles est limitée à la position de la caméra, mais ne permet pas la modification en ligne de l'ensemble des phénomènes marins tels qu'ils sont récapitulés dans le tableau de la figure 3. D'autres approches pour l'animation temps réel de la mer combinent l'approche spectrale pour la représentation des grandes surfaces sans effet de la profondeur avec une résolution numérique directe des équations de Navier-Stokes simplifiées pour la représentation locale de détails autour d'objets flottants ou par faible profondeur [KM90, CDVL95, Gom00] (voir [AM02] pour une revue récente sur la représentation graphique des fluides en général, non spécifique à la mer). Les géométries des deux calculs sont mixées linéairement pour obtenir un aspect visuellement correct et des effets de mousse et d'embruns sont ajoutés [JG01]. Un bateau peut alors interagir dynamiquement avec la mer en y apportant localement son sillage. Cependant, le sillage n'est modélisé qu'auprès du navire et ne va pas s'étendre sur tout le plan d'eau.

Ainsi, les modèles graphiques pour l'animation interactive de la mer sont de plus en plus réalistes. Cependant, ce n'est qu'exceptionnellement que la notion de plan d'eau hétérogène est abordée, notion pourtant essentielle pour le marin. Aucun modèle ne propose l'animation d'un plan d'eau incluant simultanément les groupes de vagues, les déferlements et les effets du vent, de la profondeur et des courants.

5 Conclusion

Cet état de l'art sur les états de mer nous a permis de cerner les principales contraintes que l'infographiste devra respecter pour qu'une animation temps réel de la mer soit crédible aux yeux des marins tout en restant conforme aux principaux modèles océanographiques.

Les marins observent sur la mer des phénomènes localisés leur permettant véritablement de "lire" un plan d'eau hétérogène. A partir des phénomènes observés notamment sur les groupes de vagues, ils en déduisent des propriétés de l'environnement localisées sur le plan d'eau, à savoir les vents, les courants et la profondeur principalement. Ces caractéristiques localisées sur la mer évoluent dynamiquement et elles sont décrites par un vocabulaire maritime spécifique dont chaque terme est associé à un phénomène observable. Dans le cadre d'une animation interactive de la mer utilisable par des marins, le modèle de mer virtuelle doit présenter en temps réel les phénomènes observés et proposer la médiation d'un langage en terme métier afin de spécifier interactivement un plan d'eau hétérogène. Cette mer des marins a été résumée dans le tableau récapitulatif de la figure 3 page 3.

L'expertise océanographique a été réalisée dans le but de modéliser de manière physiquement crédible la mer des marins dans un modèle interactif d'animation phénoménologique de la mer. Nous avons notamment distingué deux types d'entités énergétiques : les groupes de vagues et les déferlements. Ces deux types d'entités interagissent entre elles et avec l'environnement (vent, courant, profondeur) pour générer un état de mer hétérogène où les différents phénomènes observés par les marins sont expliqués physiquement, et l'on dispose de formules théoriques et/ou empiriques permettant de quantifier les échanges d'énergie, ou plus précisément d'action, car c'est l'action qui est conservée dans ces mécanismes d'interaction. Cette expertise met en évidence le fait que la modélisation

⁵Nadeo : <http://www.nadeo.com>

⁶*Virtual Skipper* est dédié à la pratique virtuelle de la régate en voilier, en représentant le vent par des effets de texture et la bathymétrie par des effets de transparence. Mais apparemment, ni la bathymétrie ni les courants ni le vent n'influencent localement la géométrie de la surface de la mer ; notons que ces travaux, certainement inspirés par [JG01], n'ont pas fait l'objet de publications scientifiques. : <http://www.virtualskipper3.com/index.html>

océanographique des états de mer est la superposition de plusieurs modèles physiques de phénomènes considérés indépendamment les uns des autres.

Les modèles graphiques pour l'animation interactive de la mer se déclinent principalement en une approche particulière donnant accès au mouvement des particules et à des effets bathymétriques selon le modèle océanographique de Gerstner générant une nappe trochoïdale, et en une approche spectrale s'attachant à représenter une carte d'altitude par la superposition de nappes sinusoïdale dont la répartition fréquentielle respecte certains spectres océanographiques des états de mer complètement développée, par grande profondeur. Les modèles les plus récents combinent ces deux approches avec d'autres solutions numériques locales des équations de Navier-Stokes et proposent des animations semblant de plus en plus réalistes, mais ce n'est qu'exceptionnellement qu'ils s'attachent à la représentation de la notion de plan d'eau hétérogène. Aucun modèle ne tient compte simultanément à l'échelle d'un plan d'eau hétérogène d'une dizaine de kilomètre des effets locaux des déferlements, des vents, des courants et de la bathymétrie sur des groupes de vagues, et ce à toutes les échelles de longueur d'onde, phénomènes pourtant essentiels pour que la simulation maritime ait du sens pour les marins et reste physiquement crédible aux yeux des océanographes.

La nouvelle génération de modèles d'animation temps réel de la mer devra être capable de gérer cette complexité liée à la diversité des modèles (groupes d'ondes, déferlements, vents, courants, hauts-fonds...), à la diversité des interactions entre ces entités, et à la diversité des effets visuels et sonores associés.

Références

- [AAB⁺95] A. Arneodo, F. Argoul, E. Bracy, J. Elezgaray, and J.F. Muzy. *Ondelettes, multifractales et turbulences*. Diderot, Art et Sciences, Paris, 1995.
- [AM02] N. Adabala and S. Manohar. Techniques for realistic visualisation of fluids : a survey. *Computer Graphics*, 21(1) :65–81, 2002.
- [Ard01] F. Ardhuin. *Swell across the continental shelf*. PhD thesis, Naval Postgraduate School, 2001.
http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/MODELES/crest.f.html.
- [BG69] F.P. Bretherton and C.J. Garrett. Wave trains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 302 :529–554, 1969.
- [Bie52] F. Biesel. *Gravity waves*, volume 521, chapter Study of wave propagation in water of gradually varying depth, pages 243–253. National Bureau of Standards Circular, 1952.
- [BJT89] M.L. Banner, I.S.F. Jones, and J.C. Trinder. Wavenumber spectra of short gravity waves. *Fluid. Mech.*, 198 :321–344, 1989.
- [BP74] M.L. Banner and O.M. Phillips. On the incipient breaking of small scale waves. *Fluid Mech.*, 65 :647–656, 1974.
- [BS66] D.J. Benney and P.G. Saffman. Nonlinear interactions of random waves in a dispersive medium. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 289 :301–380, 1966.
- [BT98] M.L. Banner and X. Tian. On the determination of the onset of breaking for modulating surface gravity water waves. *Fluid Mech.*, 367 :107–137, 1998.
- [CDVL95] J.X. Chen and N. Da Vitoria Lobo. Toward interactive rate simulation of fluids with moving obstacles using Navier-Stokes equations. *Graphical Models and Image Processing*, 57(2) :107–116, 1995.
- [CGG01] J.M. Cieutat, J.C. Gonzato, and P. Guitton. A new efficient wave model for maritime training simulator. *Computer Graphics*, 17 :202–210, 2001.
- [CGG03] J.M. Cieutat, J.C. Gonzato, and P. Guitton. A general ocean waves model for ship design. In *Virtual Concept*, Biarritz, France, 2003. À paraître.
- [CLPMC95] B. Chapron, A.K. Liu, C.Y. Peng, and E. Mollo-Christiensen. Higher order spectral and scale analysis of surface height fluctuations. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :151–173, 1995.
- [CM54a] C.S. Cox and W.H. Munk. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter. *J. Opt. Soc. Am.*, 44 :838–850, 1954.
- [CM54b] C.S. Cox and W.H. Munk. Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *J. Mar. Res.*, 13 :198–227, 1954.
- [DD96] M.A. Donelan and W.M. Drennan. Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves. *Journal of Physical Oceanography*, 26(9) :1901–1914, 1996.
- [DGDT98] W.M. Drennan, H.C. Graber, M.A. Donelan, and E.A. Terray. Directional wave measurements from the ASIS (Air-Sea Interaction Spar) buoy. In *Oceans*, pages 414–418, 1998.
- [Dun81] J.H. Duncan. An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil. *Proc. Roy. Soc. London*, 337 :331–348, 1981.
- [DY94] M. Donelan and Y. Yuan. *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapter Physical description of wave evolution ; wave dissipation by surface processes, pages 143–155. Cambridge University Press, 1994.
- [FR86] A. Fournier and W.T. Reeves. A simple model of ocean wave. *Computer Graphics*, 13 :75–84, 1986.
- [Gar97] A. Gareau. *Utilisation des systèmes de particules pour la simulation de phénomènes naturels, présentation d'une architecture permettant l'intégration de systèmes animés hétérogènes*. PhD thesis, Université de Lyon 1, 1997.
- [Ger04] F.J. Gerstner. *Theorie der wellen*. Abhandlungen der königlichen böhmischen. Gesellschaft der Wissenschafte, Prague, 1804.
- [GGD01] S. Grilli, P. Guyenne, and F. Dias. A fully non-linear model for the three-dimensional overtuning waves over arbitrary bottom. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35 :829–867, 2001.
- [Gib79] J.J. Gibson. *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London, 1979.
- [GM84] A. Grossmann and J. Morlet. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 15(4) :723–736, 1984.
- [Gom00] M. Gomez. Interactive simulation of water surfaces. In *Games Programming Gems*, pages 185–193. Charles River Media, 2000.
- [GS00] J.C. Gonzato and B.L. Saëc. On modelling and rendering ocean scenes. *Computer Animation*, 11(1) :27–37, 2000.
- [Has62] K. Hasselmann. On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1 : general theory. *Fluid. Mech.*, 12 :481–501, 1962.
- [HBB⁺73] K. Hasselmann, T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, A8(12) :1–95, 1973.
- [HDDDM⁺00] D. Hauser, H. Dupuis, X. Durrieu De Madron, C. Estournel, C. Flamant, J. Pelon, P. Queffeuilou, and J.M. Lefèvre. La campagne FETCH : étude des échanges océan/atmosphère dans les conditions côtières du Golfe du Lion. *La Météorologie*, 8(29) :14–31, 2000.
- [HH85] S. Hasselmann and K. Hasselmann. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1 : a new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Phys. Oceanogr.*, 15 :1369–1377, 1985.

- [HHAB85] S. Hasselmann, K. Hasselmann, J.H. Allender, and T.P. Barnett. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 2 : parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Phys. Oceanogr.*, 15 :1378–1391, 1985.
- [HNC02] D. Hinsinger, F. Neyret, and M.-P. Cani. Interactive animation of ocean waves. In *Symposium on Computer Animation (SCA)*, pages 161–166, 2002. <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2002/HNC02>.
- [Iac00] P. Iachkine. Étude du plan d'eau de Sydney : identification des courants de marées et des effets du relief dans la baie de Sydney. Technical report, Ecole Française de Voile (ENV), 2000.
- [Jan94] P.A.E.M. Janssen. *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapter Physical description of wave evolution ; wave growth by wind, pages 71–112. Cambridge University Press, 1994.
- [JBS03] S. Jeschke, H. Birkholz, and H. Schmann. A procedural model for interactive animation of breaking ocean waves. *Computer Graphics Posters Proceedings*, 2003.
- [JG01] L.S. Jensen and R. Golias. Deep-water animation and rendering. In *Game Developer 's Conference (Gamasutra)*, 2001.
- [KCD⁺94] G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P.A.E.M. Janssen. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press, 1994.
- [KM90] M. Kass and G. Miller. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics. *Computer Graphics*, 24(4) :49–57, 1990.
- [Lam32] H. Lamb. *Hydrodynamics*, volume 6. Dover, New York, 1932.
- [LH57] M.S. Longuet-Higgins. The statistical analysis of a random moving surface. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London : Series A - Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 249 :321–387, 1957.
- [LH69] M.S. Longuet-Higgins. On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves. *Proc. Roy. Soc. London*, A310 :151–159, 1969.
- [LH86] M.S. Longuet-Higgins. Wave group statistics. In E.C. Monahan and G. Mac Niocail, editors, *Oceanic Whitecaps*, pages 15–35. Reidel, D. Publishing Compagny, 1986.
- [Lia99] T. Liakos. *Weak imposition of boundary conditions in the Stokes problem*. PhD thesis, University of Pittsburg, PA, 1999.
- [LL60] L.D. Landau and E.M. Lifshitz. *Mechanics*. Pergamon Press, Addison-Wesley edition, 1960.
- [Lov03] J. Lovisicach. Complex water effects at interactive frame rates. *Computer Graphics (WSCG)*, 11(1), 2003. http://wscg.zcu.cz/wscg2003/Papers_2003/B02.pdf.
- [LP95] J.C. Lombardo and C. Puech. Modélisation d'objets déformables avec un système de particules orientées. *Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 10(4) :337–354, 1995.
- [LPCMC95] A.K. Liu, C.Y. Peng, B. Chapron, and E. Mollo-Christiensen. Direction and magnitude of wind stress over wave groups observed during SWADE. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :175–194, 1995.
- [Man75] B. Mandelbrot. *Les objets fractals - forme, hasard et dimension*. Flammarion, Paris, 1975.
- [Max81] N.L. Max. Vectorized procedural models for natural terrain : waves and islands in the sunset. *Computer Graphics*, 8 :317–324, 1981.
- [May92] R. Mayençon. *Météorologie marine*. EMOM, Edilarge, 1992.
- [Mil57] J.W. Miles. On the generation of surface waves by shear flows. *Fluid Mechanics*, 3 :185–204, 1957.
- [Mil77] J.W. Miles. On Hamilton's principle for surface waves. *Fluid Mechanics*, 83 :153–182, 1977.
- [Mit68] H. Mitsuyasu. On the growth of the spectrum of wind-generated waves. 1. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 16 :251–264, 1968.
- [Mit69] H. Mitsuyasu. On the growth of the spectrum of wind-generated waves. 2. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 17 :235–243, 1969.
- [MM02] W.K. Melville and P. Matusov. Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417 :58–63, 2002.
- [Moi71] B. Moitessier. *La longue route*. Arthaud, 1971.
- [MWM87] G.A. Mastin, P.A. Watterger, and J.F. Mareda. Fourier synthesis of ocean scenes. *Computer Graphics*, 14 :16–23, 1987.
- [MZ69] E. Monahan and C.R. Zietlow. Laboratory comparisons of fresh-water and salt-water whitecaps. *Geophys. Res.*, 74 :6961–6966, 1969.
- [PA01] S. Premože and M. Ashikmin. Rendering natural waters. *Computer Graphics*, 20(4) :189–199, 2001.
- [Pea86] D.R. Peachey. Modeling waves and surf. *Computer Graphics*, 20(4) :65–74, 1986.
- [Per85] K. Perlin. An image synthesizer. *Computer Graphics*, 12 :287–296, 1985.
- [Phi58] O.M. Phillips. The equilibrium range in the spectrum of wind-generated water waves. *Fluid Mechanics*, 4 :426–434, 1958.
- [Phi77] O.M. Phillips. *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press, 1977.
- [Phi85] O.M. Phillips. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *Fluid Mechanics*, 156 :505–531, 1985.
- [PLCMC95] C.Y. Peng, A.K. Liu, B. Chapron, and E. Mollo-Christiensen. Wavelet analysis of sea surface flux and wave by swell. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :195–208, 1995.
- [PM64] W.J. Pierson and L. Moskowitz. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of s.a. kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69 :5181, 1964.
- [RC03] N. Reul and B. Chapron. A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse, 2003.
- [RM90] R.J. Rapp and W.K. Melville. Laboratory measurements of deep water breaking waves. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A331 :735–780, 1990.
- [Rob89] P. Robin. *Vagues, l'énergie magnifique*. AGEF, 1989.
- [Saw62] M.D. Sawnhey. A study of ocean wave amplitudes in terms of the theory of runs of a Markov train process. Technical report, New York University, 1962.
- [SB01] T.A. Stoffregen and B.G. Bardy. On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1) :195–261, 2001.
- [SDT97] J. Saury, M. Durand, and J. Theureau. L'action d'un entraîneur expert en voile en situation de compétition : étude de cas. Contribution à une analyse ergonomique de l'entraînement. *Science et Motricité*, 31 :21–35, 1997.
- [Sha95] Y.A. Sharkov. Expérimental investigations of the lifetime for breaking wave dispersive zone. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 30 :808–811, 1995.
- [SM47] H.U. Sverdrup and W.H. Munk. Wind, sea, and swell : theory of relations for forecasting. Technical Report H.O. Pub. 601, U.S. Navy Hydrographic Office, 1947.
- [TB87] P.Y. Ts'o and B.A. Barsky. Modeling and rendering waves : wave-tracing using beta-splines and reflective and refractive texture mapping. *Computer Graphics*, 6(3) :191–214, 1987.
- [TDG00] S. Thon, J.M. Dischler, and D. Ghazanfarpoor. Ocean waves synthesis using a spectrum-based turbulence function. In *IEEE-Computer Graphics International (CGI)*, pages 65–74, Suisse, 2000. IEEE Computer Society.
- [Tem84] R. Temam. *Navier-Stokes equations : theory and numerical analysis*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1984.
- [Tes01] J. Tessendorf. Simulating ocean water. In *SIGGRAPH, Courses Notes*, pages 3–13–18,45–62, 2001.
- [Tol89] H.L. Tolman. The numerical model WAVEWATCH : a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Technical Report DUT-CHGE-89-2, ISSN 0169-6548, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft Univ. of Techn., 1989.
- [Wam⁺88] WAMDI-group : S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky, and J.A. Ewing. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *Phys. Oceanogr.*, 18 :1775–1810, 1988.
- [Whi74] G.B. Whitham. *Linear and nonlinear waves*. Wiley, New York, 1974.