

Visualisation de la mer : un épiphénomène maritime

M. Parenthoën, T. Jourdan, J. Tisseau

Laboratoire d'Ingénierie Informatique / Centre Européen de Réalité Virtuelle
{parenthoen, jourdan, tisseau}@enib.fr

Résumé : *Aucun des modèles actuels de l'animation interactive de la mer ne tient compte simultanément pour un plan d'eau hétérogène à l'échelle de la dizaine de kilomètres carrés des effets locaux des déferlements, du vent, des courants et de la bathymétrie sur des groupes de vagues de toutes les longueurs d'onde, phénomènes pourtant essentiels pour que la simulation maritime ait du sens pour les marins et reste physiquement crédible aux yeux des océanographes. Nous proposons une nouvelle approche pour l'animation interactive temps-réel de la mer : plutôt que de résoudre numériquement des équations du type Navier-Stokes sur un maillage prédéfini, nous utilisons des résultats théoriques et expérimentaux de l'océanographie pour modéliser des entités autonomes, interagissant en un système multi-agents sans passer par un maillage ni prédéfini, ni adaptatif. Notre modèle IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) comprend des entités autonomes telles que des groupes de vagues, des déferlements actifs et passifs, des vents locaux, des haut-fond et des courants. Une partie de la totalité des interactions est modélisée. Dans une telle approche, la visualisation de la mer apparaît comme un épiphénomène, où l'observateur humain est au même niveau conceptuel que les entités réalisant l'animation.*

Mots-clés : animation phénoménologique, simulation interactive, système multi agents, mer virtuelle.

1 Introduction

La modélisation de l'animation phénoménologique interactive de la mer en réalité virtuelle doit réunir les trois points de vue maritime, océanographique et infographique. Les marins utilisent un vocabulaire spécifique pour décrire la mer comme un plan d'eau hétérogène sur lequel ils observent des phénomènes localisés qui vont guider les stratégies de navigation [PGT03]. Les océanographes modélisent ces phénomènes comme un système complexe au sein duquel de nombreux modèles se superposent (figure 1).

phénomène modélisé	modèles physiques	paramètres
groupe de vagues	Ondes localisées par une enveloppe d'extention finie [LH57, Saw62, LH86] se propageant le long de rais [KH94]. Analyse par ondelettes avec analysatrice de Morlet 2D [AAB ⁺ 95, CLPMC95, DD96a].	âge, spectre, nombre de vagues principales, vecteur d'onde moyen, position moyenne, vitesse de groupe, enveloppe.
déferlement	Déferlement actif : critères de déferlement [Dun81, RM90, LH94, GPWS96], activité du déferlement [Phi85, MM02]. Déferlement passif : disparition progressive des turbulences et de la mousse par relaxation [MZ69, BJT89, CL98, RC04].	largeur des fronts déferlants, durée de phase active, quantité d'action, profondeur de mousse, durée de relaxation
interactions groupe/groupe	Cinématique : interaction par déferlements [BP74]. Résonance : interaction de quadruplets [BS66, HBB ⁺ 73, Jan03].	vecteurs d'onde, pulsations et amplitudes des groupes en interaction.
interactions groupe/déferlement	Transferts d'action et dissipation des vagues courtes par la mousse passive [LH69, Whi74]. Allongement des crêtes [BT98], augmentation du nombre de vagues [DY94].	vitesse particule/crête, profondeur de mousse, longueurs d'onde dissipées.
interactions groupe/vent	Âge d'un état de mer : vitesse de friction, transfert d'énergie vers la mer [Mil57, Phi58, Jan94, LPCMC95]. Résultats empiriques [SM47, SC66, BW67, MCR82, PDH92, DD96b].	champ de vecteurs "vent en altitude", vecteurs d'onde, cambrure, taux d'avance de crête d'une vague.
interactions groupe/courant	Conservation des crêtes et de l'action [BG69, Phi77]. Réfraction et élargissement des groupes par gradients de courant.	champ de vecteurs "courant de surface", vecteurs d'onde, pulsations des groupes, amplitudes et phases locales des vagues.
interactions groupe/profondeur	Conservation des crêtes et de l'énergie. Réfraction dispersive et élargissement des groupes [Wil75, Wamdi88].	bathymétrie, vecteurs d'onde moyens, pulsations moyennes des groupes, amplitudes et phases locales des vagues.

Ce tableau résume les principaux phénomènes utilisés par les marins et modélisés en océanographie physique. Chaque phénomène est modélisé indépendamment des autres et les modèles physiques dépendent de paramètres.

FIG. 1 – Modélisation océanographique des phénomènes observés par les marins

Les modèles infographiques actuels pour l'animation interactive et temps réel¹ de la mer sont basés sur la simplification de 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 solution explicite dans le cas général [KM90, CDVL95]. La complexité algorithmique de leur résolution numérique directe ne permet

¹La communauté infographiste considère une animation "temps réel", lorsque plus de 10 images peuvent être calculées en une seconde.

pas l'animation d'un plan d'eau de plusieurs kilomètres carrés [Gom00] et le but de ces équations différentielles n'est pas l'interactivité : il est nécessaire de donner des conditions aux limites avant de commencer les calculs [Tem84]. Pour l'animation d'un tel plan d'eau, on trouve deux approches principales inspirées de travaux océanographiques : l'approche particulière [FR86, Pea86, GS00, CGG01] s'appuyant sur [Ger04, Bie52] et l'approche spectrale [MWM87, Tes01, PA01, CGG03] à partir de [Has62, PM64]. Récemment, ces deux approches ont été combinées entre elles [TDG00, HNC02] ou avec des résolutions numériques locales directes des équations de Navier-Stokes [JG01, Lov03]. Quelque soit l'approche considérée, une grille de points géométrique représente la surface de l'eau et ce maillage est animé. Cependant, aucun des modèles actuels de l'animation interactive de la mer ne tient compte simultanément pour un plan d'eau hétérogène à l'échelle de la dizaine de kilomètres carrés des effets locaux des déferlements, du vent, des courants et de la bathymétrie sur des groupes de vagues de toutes les longueurs d'onde, phénomènes pourtant essentiels pour que la simulation maritime ait du sens pour les marins et reste physiquement crédible aux yeux des océanographes [PGT03].

Nous proposons une nouvelle approche pour l'animation interactive temps-réel de la mer : plutôt que de résoudre numériquement des équations du type Navier-Stokes sur un maillage prédéfini ou adaptatif [Cou96, Luc00, Fed03], nous utilisons des résultats théoriques et expérimentaux de l'océanographie pour modéliser des entités autonomes, interagissant en un système multi-agents sans passer par un maillage ni prédéfini, ni adaptatif. Chaque entité met en œuvre une démarche active de perception en précisant *où* et *quand* elle à besoin d'observer *quoi*. Ces activités, que nous appelons *aisthesis*² en référence aux travaux sur la perception comme anticipation sensorimotrice en neurophysiologie [Ber97], structurent la topologie spatio-temporelle et sémantique du milieu servant de médiateur d'interaction. Chaque entité agit sur le milieu ainsi créé en fonction de ses savoir-faire. Puis chaque entité s'adapte aux propriétés perçues en modifiant les paramètres de son comportement. Notre modèle IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) comprend des entités autonomes telles que des groupes de vagues, des déferlements actifs et passifs, des vents locaux, des hauts-fonds et des courants. Les modèles océanographiques de ces entités physiques et de leurs interactions sont décrits dans [PJT04] ; nous précisons ici les principes informatiques de l'implémentation d'un tel modèle d'environnement naturel et de sa visualisation graphique.

Dans une telle approche, la visualisation de la mer apparaît comme un épiphénomène, où l'observateur humain est au même niveau conceptuel que les entités réalisant l'animation. En effet, l'animation de la mer s'exécute indépendamment de sa visualisation. La visualisation de la mer doit spécifier *où* et *quand* observer *quoi*, et participe ainsi à la création de la structure spatio-temporelle et sémantique du milieu ; en fonction de ce qui est vu par l'observateur humain, ce dernier décide où il veut observer les prochains phénomènes.

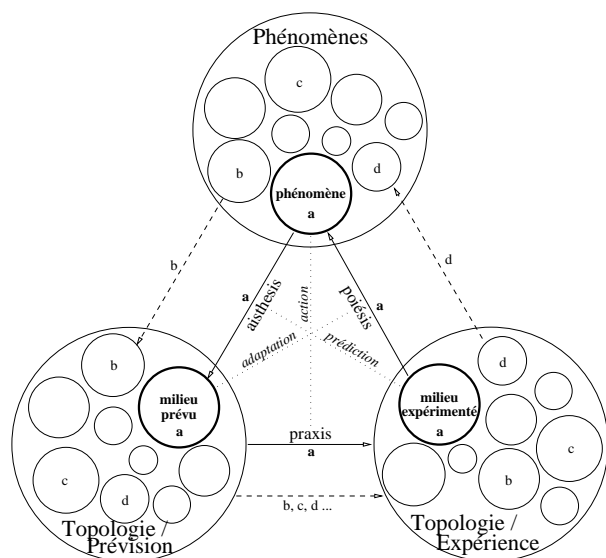
La prochaine section spécifie les principes du modèle de mer implémenté comme un système multi-agents interagissant *via* la médiation d'un milieu généré par les entités mêmes de l'organisation. La section 3 décrit la révélation de la mer par l'entité visualisateur. Enfin, nous prendrons un peu de recul sur notre approche de la visualisation comme un épiphénomène dans la section 4 de conclusion.

2 Les principes du modèle

Typiquement, l'être humain observe certains phénomènes à partir desquels il détermine ses actions : il convient alors de concevoir un modèle d'animation en fonction des phénomènes que l'on veut pouvoir observer [Coz96]. Ces éléments de psychologie écologique [Gib79] nous servent de cause finale vis à vis de notre modèle d'environnement et fournissent ainsi une méthode de construction du modèle en déterminant les phénomènes qui doivent être présentés pour réaliser l'immersion de l'homme dans l'environnement. Pour la mer, il s'agit des phénomènes décrit par le vocabulaire marin des états de mer [May92, SDT97, Iac00]. L'organisation de ces phénomènes est complexe, *i.e.* : "un grand nombre d'entités indépendantes interagissent de nombreuses façons [Wal92]". Ces phénomènes marins sont régis par les lois physiques de l'océanographie caractérisant les phénomènes et leurs interactions (figure 1). Nous proposons alors de considérer notre modèle d'animation phénoménologique de la mer comme un système multi modèles, où chaque modèle résulte de la description d'un phénomène considéré indépendamment des autres. Le modèle décrivant un phénomène doit vérifier un principe d'autonomie [TH03] : le phénomène doit être réifié en une entité autonome, possédant des capacités sensorimotrices et décisionnelles qui lui sont propres. L'ensemble de ces entités autonomes, dont l'opérateur humain, interagissent alors en un Système Multi-Agents (SMA) [Fer97]. Dans un SMA, un agent est une entité autonome, possédant des capacités sensorimotrices, et communiquant avec l'environnement déterminé par les autres agents. Ces agents sont situés dans l'environnement où ils évoluent selon leurs modèles de comportement qui définissent leurs capacités de perception, d'action et de décision en fonction de

²*Aisthesis* : $\sqrt{\text{grec : perception}}$. 1) faculté de sentir, sentiment, les cinq sens, épreuve par les sens ; 2) intelligence, conception, connaissance par les sens, faculté de pressentir comme *pressentir l'avenir*.

caractéristiques internes et des interactions avec l'environnement. Ces interactions sont médiatisées par un milieu [FM96]. La structure spatio-temporelle du milieu n'est pas prédéfinie, mais est construite au fur et à mesure par les entités elles-mêmes, en reprenant ainsi les concepts de la biologie relationnelle [Dub73, Var79, Ros91, Ste02]; chaque entité contribue à cette structure en créant un élément de topologie, en fonction de ses besoins pour son auto-adaptation. L'ensemble des entités donne alors des propriétés à chaque élément de topologie. Puis, chaque entité adapte alors son comportement aux propriétés effectivement perçues dans l'environnement par son élément de topologie. La figure 2 illustre cette organisation des entités réalisant la simulation physique des phénomènes.



Ci-contre, *a, b, c* ou *d* désignent des entités autonomes de l'organisation. Une entité autonome est la donnée d'un triplet d'objets actifs [HTRC02], dont les activités traduisent respectivement ce que cherche à percevoir l'entité, ce que fait l'entité sur le monde à percevoir par l'ensemble de toutes les entités, ce que devient l'entité en fonction des propriétés effectivement perçues du monde.

- Chaque entité autonome (*a, b, ...*) structure le milieu en lui insérant des éléments de topologie spatio-temporelle avec des propriétés prévues; la topologie du milieu est alors la réunion des éléments topologiques de l'ensemble des entités; *c*'est le rôle d'*aisthesis* des entités.
- Chaque entité (*a, b, c, d, ...*) agit en fonction de ses savoir-faire sur cette topologie globale en lui donnant des propriétés expérimentées; *c*'est le rôle de *praxis* des entités.
- Chaque entité (*a, d, ...*) adapte son comportement en fonction des caractéristiques perçues du milieu: *i.e.* les propriétés de l'élément topologique qu'elle a préalablement créé, propriétés déterminées par l'ensemble des entités; *c*'est le rôle de *poiesis* des entités.

Le milieu sert alors de médiateur d'interactions entre les entités de l'organisation. L'organisation prend vie si les entités qui la constituent, activent leurs différents rôles de prédiction perceptive, d'action sur le milieu et d'adaptation au milieu.

FIG. 2 – Animation phénoménologique vue globalement comme une organisation d'entités autonomes

Nous précisons maintenant l'architecture générale permettant l'implémentation d'une telle organisation. Puis nous caractérisons la réification des phénomènes physiques en des entité autonome de cette organisation. Enfin, nous spécifions les paramètres et le rôle du médiateur des interactions entre les entités de l'organisation.

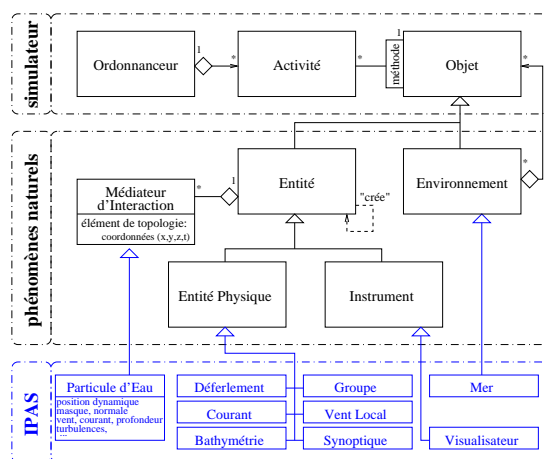
2.1 Architecture générale

L'implémentation de notre modèle d'animation interactive de la mer se décompose en trois niveaux, comme l'illustre le diagramme UML de la figure 3. Le premier consiste en l'ordonnancement des activités d'objets actifs [HTRC02]. Le deuxième est celui de l'environnement virtuel constitué d'entités physiques présentant les phénomènes naturels, dont les interactions sont médiatisées par le milieu. Le troisième est la spécification de l'environnement virtuel à l'animation de la mer.

L'ordonnancement des activités est un processus d'itérations faisant vivre à tour de rôle les objets actifs constitutifs de l'environnement. L'ordonnanceur doit proposer des itérations asynchrones [Bau78] afin de respecter l'autonomie des entités, et chaotiques [Mie74] pour ne pas introduire de biais dans la simulation. L'implémentation de l'ordonnancement des activités d'objets actifs est réalisé *via* la bibliothèque ARéVi³, spécifiquement dédiée au problème de faire vivre des objets actifs en interactions asynchrones dans un monde virtuel.

L'Environnement virtuel est constitué d'Entités situées dans l'espace 3D et le temps. Les entités interagissent *via* des Médiateurs d'Interaction proposant un support topologique spatio-temporel permettant de localiser les interactions dans l'espace et dans le temps. L'ensemble des médiateurs d'interaction forme ce que l'on peut appeler le milieu;

³ARéVi (Atelier de Réalité Virtuelle): cette bibliothèque écrite en C++ est développée par l'équipe ARéVi du Laboratoire d'Ingénierie Informatique (LI2, <http://www.enib.fr/LI2>) au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV, <http://www.cerv.org>). Elle est le prolongement des travaux sur *oRis* [HTRC02] et des développements menés sur les versions antérieures d'ARéVi [HRT99] (première version en 1994). Elle constitue un élément stratégique pour le LI2 en permettant la capitalisation des travaux menés par les différentes composantes de l'équipe. ARéVi constitue à ce titre une solution pérenne et évolutive. ARéVi offre toutes les fonctionnalités classiques d'une plateforme de réalité virtuelle avec en plus, au sein de son noyau, des particularités permettant de construire des environnements virtuels multi-agents. Les choix techniques reposent tous sur des standards: langage de programmation C++ (extensions possibles en Java), rendu graphique OpenGL, géométrie des objets VRML (ou autre), son spatialisé *OpenAL*, description de données XML... Ils permettent de construire des solutions extensibles par des tiers et intégrables dans des applicatifs développés eux-mêmes sur ces standards. Enfin, ils confèrent à ARéVi une indépendance vis à vis des plateformes matérielles et des systèmes d'exploitation (utilisation de Cygwin pour compiler ARéVi sous Windows). Elle est disponible sous licence LGPL sur le site de Fabrice Harrouet (<http://www.enib.fr/~harrouet>).



Le simulateur se résume en un *Ordonnanceur* gérant des *Activités* qui appellent des méthodes d'*Objets* ; il doit être asynchrone et chaotique (voir texte). Les phénomènes naturels et leur observation sont représentés dans le conteneur *Environnement* par des *Entités* ; l'observation est médiatisée par un *instrument* de mesure, tandis que les phénomènes sont réifiés en des *entités physiques*. Ces dernières interagissent selon un *Médiateur d'Interaction* proposant un support topologique spatio-temporel qui permet à l'environnement virtuel de localiser les interactions dans l'espace et dans le temps. Le modèle IPAS spécifique à la mer, dessiné en bleu, dérive de cette architecture de simulation phénoménologique. Le visualisateur est une entité particulière composée d'un grand nombre de particules d'eau formant un maillage de la surface à observer et devant être mises à jour à une fréquence supérieure à 10 Hz par les entités physiques constitutives de l'environnement.

FIG. 3 – Diagramme UML de la simulation phénoménologique spécifiée maritime : IPAS

nous respectons ainsi les principes de l'interaction des entités situées dans un environnement, tels qu'ils sont décrits par [FM96]. Le rôle de l'*Environnement* est alors de résoudre les problèmes topologiques relatifs à la localisation des *Entités* et des *Médiateurs d'Interaction*, afin de répondre à : *qui agit où et quand ?* Les phénomènes naturels que l'on cherche à simuler sont réifiés en des *Entités Physiques* situées dans l'environnement. Les *Entités Physiques* assurent la cohérence physique de la simulation des phénomènes naturels. Chaque *Entité Physique* possède trois méthodes particulières : l'*aisthesis* créant des *Médiateurs d'Interaction* rassemblés en un élément de topologie, la *praxis* donnant des propriétés à tout élément de topologie situé dans son voisinage d'influence, et la *poiesis* modifiant le comportement de l'entité ou créant de nouvelles entités. Les *Instruments* sont des *Entités* particulières permettant d'observer les phénomènes en mesurant leurs effets sur des *Médiateurs d'Interaction*, l'interaction étant alors celle du modèle avec l'être humain qui peut être simple observateur, acteur immergé sensoriellement, ou modélisateur par la médiation du langage de programmation. Comme les *Entité Physiques*, les *Instruments* ont potentiellement les trois méthodes décrites ci-dessus mais le plus souvent, leur *praxis* est négligée.

Les *Groupes*, les *Déferlements*, les *Vents*, les *Courants* et la *Bathymétrie* sont des *Entités Physiques* assurant la cohérence océanographique des phénomènes et de leurs interactions *via* les propriétés de *Particules d'Eau* : position, normale, vent, courant, profondeur, turbulences... La visualisation de la mer est prise en charge par une entité *Visualisateur* créant un maillage de particules spécifiques, animé à plus de 10 Hz par les groupes de vagues et texturé en fonction des groupes, des déferlements et des vents locaux.

2.2 Les entités physiques

Chaque entité physique provient de la réification d'un phénomène physique (figure 1) observé par les marins. Ces entités autonomes sont situées dans l'environnement et possèdent leurs propres comportements (figure 4). Le modèle de comportement d'une entité est associé à une capacité de prédiction, c'est à dire un domaine de validité temporel dans lequel le comportement de l'entité ne nécessite pas de nouvelle perception des propriétés du milieu pour rester physiquement correct. La connaissance de ce domaine temporel dans lequel l'entité peut évoluer en autonomie permet de déterminer une fréquence aux actes perceptifs de cette entité. Chaque entité sait alors qu'elle aura besoin de tel type d'information localisé dans tant de temps et à tel endroit, relativement à sa prédiction. A l'heure actuelle, les entités physiques modélisées dans IPAS se déclinent en un modèle océanographique pour les groupes de vagues et les déferlements, et un modèle descriptif pour les vents, les courants et la bathymétrie, dont nous ne donnons ici qu'un aperçu (pour une description exhaustive de ces modèles voir [PJT04]).

Chaque groupe de vagues est contrôlé par un train d'ondes lui donnant des caractéristiques moyennes (extention finie de l'enveloppe Gaussienne en longueur et en largeur, vitesse de groupe, nombre de vagues, longueur d'onde, période, profile horizontal des crêtes, vitesse de phase, âge du groupe), auquel s'ajoute des perturbations locales en phase et en amplitude attachées aux crêtes des vagues qui le parcourent, afin de modéliser les aspects non-linéaires des vagues. Le groupe est sensible aux déferlements, aux courants, aux vents, à la bathymétrie et aux autres groupes. Un groupe devant pouvoir réaliser des transferts d'action vers les déferlements, son domaine prédictif ne peut exéder la durée de vie d'un déferlement (les autres phénomènes étant observables à plus basse fréquence). Le bon sens marin ou physique permettant d'estimer à une seconde la durée de vie minimale des déferlements des vagues de plus d'un mètre de longueur d'onde, nous proposons de prendre une seconde comme capacité d'anticipation du modèle des

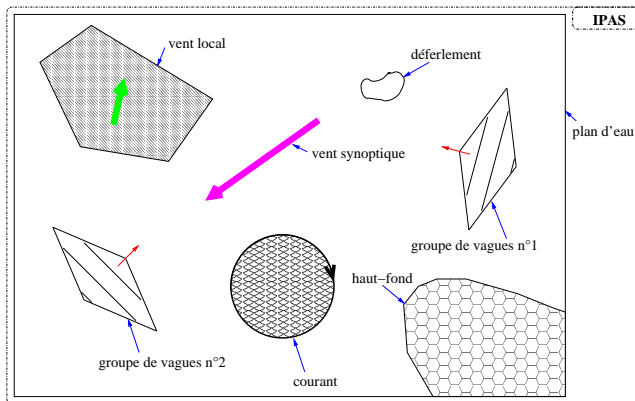


FIG. 4 – Plan d’eau hétérogène peuplé d’entités physiques autonomes

Le modèle informatique de la mer virtuelle est un SMA hétérogène composé d’entités physiques en interaction. Chaque entité autonome est située dans l’environnement et possède son propre comportement, provenant de la réification d’un phénomène physique observé par les marins : des groupes de vagues, des déferlements, un vent synoptique, des vents locaux, des hauts-fonds et des courants. Le modèle du comportement de chaque entité est caractérisé par sa capacité prédictive de ce que devrait être idéalement le comportement de l’entité. Cette notion de capacité d’anticipation donne une fréquence à laquelle l’entité doit percevoir son environnement pour s’adapter aux changements du milieu.

groupes de vagues. Aussi, les groupes de vagues activent de manière asynchrone leurs comportements perceptifs à une fréquence de 1 Hz , afin de connaître l’évolution des effets des déferlements, des vents, des courants et de la bathymétrie sur les propriétés du milieu à percevoir. Son *aisthesis* consiste à créer chaque seconde un élément de topologie constitué de cinq points répartis dans son enveloppe, dont la position est anticipée d’une seconde.

Chaque déferlement occupe une surface du plan d’eau composé de zones élémentaires de 1 m^2 contigus. Chaque zone peut être associée à une phase active ou passive du déferlement, selon qu’elle appartienne ou non au front actif du déferlement. Dans chaque zone active, un processus de fabrication de mousse et de turbulences est mis en œuvre en fonction de l’activité⁴ locale du déferlement ; tandis que dans chaque zone passive, c’est un processus de relaxation de la mousse et des turbulences. La propagation du front actif d’un déferlement étant un processus très dynamique influencé par les vagues et les vents, il semble raisonnable de mettre à jour l’activité des zones actives de 1 m^2 au moins deux fois par secondes. La dissipation de la mousse et des turbulences est par contre beaucoup plus facile à prévoir, car elle n’est sensible qu’aux courants qui la transportent et aux vents qui l’orientent en des traînées d’écumes ; l’évolution des vents et des courants étant lente, une mise à jour toutes les 10 secondes est amplement suffisante. Aussi, les déferlements activent leurs comportements perceptifs à une fréquence de 2 Hz sur leurs fronts actifs afin de connaître les effets des groupes et des vents, et de 0.1 Hz pour leurs zones de relaxation afin de connaître les effets des courants et des vents. Son *aisthesis* consiste à créer chaque demi-seconde pour son front actif un élément de topologie constitué de particules des zones actives afin de faire évoluer l’activité et de déterminer la fin de l’activité de chaque zone active, auxquelles s’ajoutent des particules localisées en avant du front actif et anticipant la propagation du déferlement ; avec toutes les dix secondes des particules supplémentaires en les zones passives.

Le synoptique ou les vents locaux évoluent continuellement au cours du temps en force et/ou en direction. La différence entre le synoptique et le vent local est que l’influence du synoptique est globale sur tout le plan d’eau sur lequel il peut créer des groupes, tandis que le vent local ne participe pas à la création de groupes et présente une enveloppe d’extention finie qui peut se déplacer et se transformer. Ces entités, modélisées par des modèles descriptifs insensibles au milieu, n’ont pas de besoin perceptif. C’est aussi le cas, en première approximation, pour les courants et la bathymétrie, dont les paramètres évoluent exclusivement en fonction du temps (l’onde de marée). Ainsi, les entités physiques participent à la création de la structure spatio-temporelle du milieu et y évoluent de manière autonome entre deux actes de perception. Un acte de perception est caractérisé par une anticipation perceptive (où et quand j’aurai besoin de quoi ?) précédant l’observation des propriétés du milieu, à partir desquelles l’entité adapte son comportement. Les interactions entre les entités sont alors médiatisées par le milieu créé par les entités, milieu auquel chaque entité contribue à donner des propriétés.

2.3 Les médiateurs d’interactions

La *Particule d’Eau* est le médiateur d’interaction pour la simulation phénoménologique de la mer. Elle en hérite le support topologique dit *position de référence* dans l’espace-temps. Il s’agit à un moment t_0 donné d’un point $M_{\vec{x}_0}^0$ de l’espace. Ces sont ces positions de références dans l’espace-temps qui sont spécifiées par les activités d’*aisthesis* des entités lors de la création de la structure spatio-temporelle du milieu (figure 5).

La *Mer* connaissant les particules d’eau les range au fur et à mesure de leur création par ordre croissant des mo-

⁴Ici, “activité” est à prendre au sens physique de taux de production, et non pas au sens informatique.

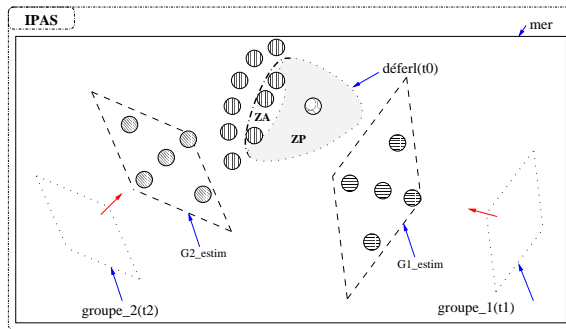


FIG. 5 – Création de la structure spatio-temporelle du milieu par les entités

Ici, trois entités physiques (deux groupes et un déferlement) construisent le milieu en jouant leurs rôles d'*aisthesis* ; les particules constitutives du milieu sont représentées par des cercles à motifs. A un moment t_0 , le déferlement prévoit d'avoir besoin de propriétés de particules dans 1/2 seconde (*i.e.* à $t_0 + 1/2$) sur son front actif actuel (**ZA**) et en avant du front dans sa direction de propagation (motif vertical) ; et dans 10 secondes (*i.e.* à $t_0 + 10$) de propriétés du milieu dans ses zones passives (**ZP**, motif bulles). A un moment t_1 , le groupe 1 prévoit d'avoir besoin de propriétés là où il sera dans 1 seconde (en **G1_estim**) ; il crée alors cinq particules (motif horizontal) pour $t_1 + 1$. De même, le groupe 2 crée en t_2 cinq particules (motif diagonal) pour $t_2 + 1$ dans **G2_estim**. La mer fera alors agir l'ensemble des entités sur cette structure spatio-temporelle pour lui donner des propriétés.

ments t_0 en lesquels les entités anticipent l'observation des propriétés. Une entité n'agira alors sur une particule temporellement situé en t_0 , que si ce moment est dans le domaine de validité de prédiction du modèle de l'entité, *i.e.* entre deux actes perceptifs. A un moment donné, avant d'exercer leurs *praxis*, les entités prennent leur positions dans l'espace d'après leurs propres modèles de comportement. La Mer peut alors spécifier les activités de *praxis* des entités à chaque moment en résolvant les problèmes de topologie spatiale liés à l'appartenance d'un médiateur au domaine d'influence de chaque entité. Afin de diminuer la complexité en $\mathcal{O}(n^2)$ de ce problème de topologie spatiale, où n est le nombre d'entités en interactions, inhérente à tout système multi-agents, le plan d'eau est pavé régulièrement en différentes régions rectangulaires. Cette solution est basée sur l'hypothèse d'une densité relativement homogène des entités peuplant le plan d'eau ; la taille de chaque pavé est alors du même ordre de grandeur que la taille moyenne des entités peuplant l'environnement. Lorsqu'une entité utilise un grand nombre de médiateurs dans son élément de topologie, comme c'est le cas de l'entité *Visualisateur*, elle doit fournir une méthode spécifique pour résoudre les problèmes de voisinages au sein de son élément de topologie.

En plus de cette position de référence, l'entité qui crée la particule précise de quel type de propriétés elle à besoin à l'aide d'un masque, afin de ne faire agir que les entités physiques dont la *praxis* influence ce type de propriété et simplifier ainsi la complexité de la résolution des relations topologiques entre les entités et les médiateurs, par une première sélection sémantique plutôt que géométrique. Une particule d'eau possède potentiellement jusqu'à dix propriétés : la position dynamique autour de la position $M_{x_0}^0$, la vitesse relative à la mer de la particule d'eau, la normale à la surface de l'eau, la liste des groupes influençant cette particule, le vent, le courant, la profondeur, l'épaisseur des turbulences, la liste des déferlements et leurs activités. Par exemple, les entités *groupes* agissent selon un modèle particulière inspiré de [Ger04] sur la position dynamique, la vitesse, la normale et chaque groupe s'ajoute à la liste des groupes si cette particule est dans son enveloppe ; et les entités *déferlements* agissent selon le modèle de [RC04] sur l'épaisseur des turbulences, la liste des déferlements et leurs activités (voir [PJT04]).

Ainsi, chaque particule est localisée sur la mer et dans le temps par une position de référence et possède des propriétés mises à jour en fonction de la *praxis* des entités physiques qui l'influence. L'activité des *praxis* est déterminée par l'environnement Mer qui connaît les positions des particules et des entités à tout moment, en résolvant les relations de voisinages entre les entités et les particules. Ces particules servent alors de médiateurs d'interaction car leurs propriétés, issues de l'influence de l'ensemble des entités présentes, sont utilisées par chaque entité physique pour adapter son comportement. L'ensemble de ces particules est créé par les entités elles-mêmes au fur et à mesure de leurs interactions. Il est en perpétuelle évolution au cours du temps, tant par le nombre de particules que par leurs positions dans l'espace, et forme le milieu dans lequel les entités interagissent.

3 L'épiphénomène visualisation

Il n'est pas nécessaire de regarder la mer pour que les phénomènes physiques qui la caractérisent aient lieu. De même, le modèle IPAS permet de simuler une partie des phénomènes physiques inhérents à la surface de la mer indépendamment de leur visualisation, hormis le fait que les phénomènes modélisés dépendent de ce que l'on cherche à percevoir. Le milieu créé par les entités physiques ne peut servir de base à la visualisation, car sa structure spatio-temporelle, adaptée à la simulation des phénomènes océanographiques, ne l'est pas à la visualisation interactive de la surface de la mer qui ressort de contraintes spécifiques à la perception humaine et à la machine réalisant l'animation interactive.

La visualisation de la mer demande de considérer l'être humain comme l'un des éléments actif du modèle ; à ce titre, il doit être vu comme une entité autonome participant à l'organisation, immergé dans l'environnement par la

médiation d'une IHM [AABP01]. L'être humain doit alors préciser la structure spatio-temporelle du milieu dont il veut pouvoir observer certaines propriétés : où et quand je regarde quoi ? Cette démarche est la même que celle mise en œuvre par les entités autonomes peuplant l'environnement et implémentée par la notion de *perception active* ou *aisthesis*. En fonction de ce qu'il perçoit, l'utilisateur décide des prochains endroits où observer les phénomènes. Les phénomènes physiques de l'environnement naturel que l'on a modélisés sont censés correspondre aux attentes de l'utilisateur. Il reste à préciser où et quand l'observateur cherche à percevoir ces phénomènes. Ces informations sont fournies par l'IHM elle-même, alimentant un modèle de perception [Mes02, Mor03, TSCT03]. L'immersion minimale retenue est visuelle et rendue par l'image d'une caméra virtuelle. L'interaction avec la caméra peut dans un premier temps être réalisée par un contrôle clavier ou par la souris, et la caméra peut être attachée par exemple à un bateau sur lequel un observateur humain est immergé. Nous ferons l'hypothèse que le modèle de perception peut être traduit en l'animation à une fréquence supérieure à 10 Hz d'une géométrie texturée, structurée en un maillage dont les points sont répartis en respectant une certaine distribution de probabilité spatiale.

Une fois spécifié un modèle de perception contrôlé à partir des propriétés fournies par l'IHM, la mer peut être instrumentée par une entité visualisateur qui a la charge de structurer le milieu en fonction de ce modèle de perception et de récupérer les propriétés pertinentes pour la visualisation de la surface de la mer. La projection des propriétés observées par l'entité visualisateur permet alors de révéler la mer sur le périphérique de visualisation de l'IHM.

3.1 L'entité visualisateur

Chaque entité *Visualisateur* représente un couple (géométrie, caméra). Nous supposons que le nombre de points constituant la géométrie est fixe et que la topologie de leurs voisinages est conservée au cours du temps. Le nombre de points utilisables dépend bien sûr de la puissance de la machine qui doit supporter la simulation. Les positions des points de la géométrie sont générées en respectant une distribution de probabilité fixée par le modèle de perception humaine. Le maillage est alors défini selon une triangulation de Delaunay [CDHM95] statique réalisée lors de l'initialisation sur des positions par défaut des points. La structure topologique de cette géométrie doit être statique pour ne pas avoir à trianguler à la volée [LKR⁺96], opération difficile dans les contraintes du temps réel, mais rien n'empêche de modifier dynamiquement cette grille au niveau des positions des points par des transformations conservant la topologie structurelle autres que les simples translations, rotations ou homothéties, comme par exemple les projections utilisées par [HNC02] afin d'adapter la représentation des détails du mouvement de la mer au point de vue de la caméra.

L'activité d'*aisthesis* du visualisateur consiste à structurer le milieu en générant tous les $10^{\text{ièmes}}$ de seconde au moins l'élément de topologie dont les particules d'eau ont comme positions de références les points de la grille déterminée par le modèle de perception humaine. Les renseignements nécessaires à la construction de l'image demandent d'avoir accès en chaque point à la position dynamique et à la normale pour reconstituer la surface de l'eau, à l'épaisseur des turbulences pour représenter la mousse passive, à l'activité des déferlements pour pouvoir régler le débit d'un système de particules⁵ [Gar97], au vent pour paramétrer la divergence de ce générateur de particules et la texture des vaguelettes avec du *bump-map* [MYV93], et aux groupes pour texturer les vagues lorsque le pas de la grille géométrique est d'un ordre de grandeur équivalent à la longueur d'onde des groupes.

L'ensemble des particules constituant l'élément topologique d'un visualisateur est trop important pour que les entités physiques influençant cette grille puissent résoudre les problèmes de topologie de leur *praxis* sans une méthode spécifique. La répartition spatiale des points de référence n'étant pas régulière, une simple méthode à base de boîtes englobantes n'est pas suffisamment efficace. Aussi, un processus d'arbre binaire inspiré du *quad-tree* [KD76] est utilisé afin de simplifier la complexité de cette opération. La fabrication de l'arbre est réalisée à l'initialisation de la géométrie, en même temps que la triangulation. Ces deux structures topologiques restent fixes d'un point de vue des voisinages pendant toute la simulation, car elles ne subissent que des transformations laissant invariante la notion de voisinage.

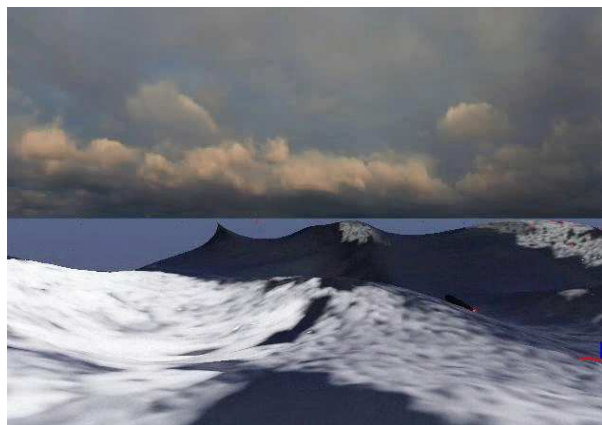
Ainsi, l'entité visualisateur permet de donner une structure spatio-temporelle au milieu, structure spécifique au problème de la perception humaine, afin d'avoir accès aux propriétés nécessaires à la visualisation de la mer, qui peut alors être révélée par le périphérique graphique.

3.2 Révélation de la mer

La révélation de la mer correspond au développement des photos des *praxis* des entités physiques peuplant la mer telles qu'elles sont prises par l'entité visualisateur (figure 6). Cette révélation dépend des caractéristiques de la carte

⁵Un système de particules est un objet graphique qui peut être très consommateur de ressources ; aussi il n'est instancié que si sa position le place dans une zone d'attention perceptive spécifiée par le modèle de perception humaine.

graphique du périphérique de visualisation et de la finesse du grain du maillage géométrique.



Cette photo est extraite d'une simulation temps réel d'un état de mer relativement jeune où une mer de vent de Nord-Ouest se superpose à une grande houle d'Ouest, avec des vents de Nord-Ouest de plus de 17 ms^{-1} correspondant au degré 8 de l'échelle de Beaufort. La mer de vent est composée ici de groupes très cambrés venant globalement du Nord-Ouest et dont la longueur d'onde caractéristique est de l'ordre de 50 m , tandis que la houle due à un ancien vent d'Ouest est composée de groupes bien organisés d'une longueur d'onde d'environ 200 m se dirigeant d'Ouest en Est. Cet état de mer croisée est caractéristique d'une bascule d'Ouest à Nord-Ouest suite au passage du front froid lors d'un coup de vent et génère de nombreux déferlements dont certains peuvent être très intenses. Des courants contraires aux vagues et des hauts-fonds peuvent provoquer localement de violents déferlements, tandis que des courants allant dans le sens des vagues auront tendance à aplatisir localement l'état de mer limitant ainsi les possibilités de déferlement. Un zodiac, contrôlé interactivement par un opérateur humain, évolue sur ce plan d'eau de 4 km^2 . La caméra, attachée en translation au zodiac, est également contrôlé par l'opérateur.

FIG. 6 – Révélation de la mer *via* les observations de l'entité visualisateur

Le matériel utilisé⁶ pour la simulation quasi temps-réel ($\sim 9\text{ fps}$) illustrée par la figure 6 est une carte graphique supportant les `vertex` et `pixel shader` version 2.0, et un processeur principal à $1,4\text{ GHz}$; seuls quelques méga-octets sont utilisés en mémoire vive par le programme et l'initialisation (`triangulation...`) prend une quinzaine de secondes. Le plan d'eau de 4 km^2 est recouvert d'environ huit mille entités physiques en interaction et la grille géométrique est composée de six mille points. Dans ces conditions, du point de vue du CPU, la complexité de la simulation physique des phénomènes océanographiques en interaction est du même ordre de grandeur que celle de l'animation de la grille géométrique.

4 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté une nouvelle approche pour la visualisation temps réel d'un environnement virtuel maritime. La simulation physique de la mer est caractérisée par la réification des phénomènes océanographiques observés par les marins en des entités autonomes interagissant en un système multi-agents.

Les interactions sont médiatisées par un milieu créé dynamiquement par les entités elles-même : chaque entité doit préciser *où* et *quand* elle aura besoin de *quoi*. La contribution à la création du milieu par une entité autonome est une démarche de perception active basée sur un principe d'anticipation, d'après la capacité prédictive sous-jacente au modèle physique déterminant l'autonomie du comportement de l'entité entre deux actes de perception. En fonction des propriétés perçues, chaque entité adapte les paramètres de son comportement et réalise alors une nouvelle prédiction perceptive.

Cette simulation de la mer est indépendante de sa visualisation qui n'apparaît que comme un épiphénomène, où l'observateur humain est au même niveau conceptuel que les entités réalisant l'animation. En effet, la visualisation de la mer doit spécifier *où* et *quand* observer *quoi*, et participe ainsi à la création de la structure spatio-temporelle du milieu. Aussi, l'entité visualisateur est l'instrument réalisant la médiation d'un modèle de perception humaine et permettant l'immersion visuelle de l'utilisateur dans l'organisation des entités physiques simulant les phénomènes océanographiques.

Le modèle d'organisation d'entité autonomes illustré par la figure 2 et appliqué ici à un environnement maritime, en dissociant la visualisation de la simulation des phénomènes, semble propice à l'animation temps réel et interactive des phénomènes naturels, non spécifiques à ceux de la mer. Plus généralement encore, ce modèle pourrait être appliqué à la notion même de modélisation. Toute modélisation est réalisée en fonction des phénomènes que l'homme cherche à observer dans l'environnement. A partir d'une idée intuitive sur un phénomène observable, l'homme propose un modèle ayant une capacité prédictive sur les propriétés attendues des observables. La comparaison entre la prédiction du modèle et les mesures expérimentales fournissent alors des pistes permettant, avec de nouvelles idées de transformer le modèle du phénomène. Cette démarche modélisatrice de l'être humain semble alors relever du même agencement conceptuel que celui proposé dans cet article à propos des entités autonomes peuplant l'organisation simulée par l'ordinateur, et renforce ainsi l'inscription de l'homme dans la boucle.

⁶La carte graphique est une GeForce FX de chez Nvidia et le CPU un Pentium IV de chez Intel.

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.
- [AABP01] H. Albrechtsen, H.H.K. Andersen, S. Bodker, and A.M. Pejtersen. Affordances in activity theory and cognitive systems engineering. Technical Report Riso-R-1287(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, 2001.
- [AM02] N. Adabala and S. Manohar. Techniques for realistic visualisation of fluids : a survey. *Computer Graphics*, 21(1) :65–81, 2002.
- [Bau78] G.M. Baudet. Asynchronous iterative methods for multiprocessors. *Journal of the association for computing machinery*, 25 :226–244, 1978.
- [Ber97] A. Berthoz. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris, 1997.
- [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.
- [BW67] T.P. Barnett and J.C. Wilkerson. On the generation of ocean wind waves as inferred from airborne radar measurements of fetch-limited spectra. *Marine Res.*, 25(3) :292–328, 1967.
- [CDHM95] M.J. Castro-Diaz, F. Hecht, and B. Mohammadi. New progress in anisotropic grid adaptation for inviscid and viscous flows simulations. Technical Report 2671, INRIA, 1995.
- [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*, pages 187–194, Biarritz, France, 2003. ESTIA.
- [CL98] Kuang-An Chang and P.L.F. Liu. Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave. *Phys. Fluid.*, 10(1) :327–329, 1998.
- [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.
- [Cou96] T. Coupez. Parallel adaptive remeshing in 3d moving mesh finite element. In B.K. Soni and al., editors, *Numerical Grid Generation in Computational Field Simulation*, volume 1, pages 783–792. Mississippi University, 1996.
- [Coz96] R. Cozot. *Environnement de simulation des systèmes physiques*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1996.
- [DD96a] 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.
- [DD96b] W.M. Drennan and M.A. Donelan. Nonlinear coalescing wave groups. In M.A. Donelan, W.H. Hui, and W.J. Plant, editors, *Symposium on The Air Sea Interface*, pages 127–132, 1996.
- [Dub73] R. Dubos. *L'homme et l'adaptation au milieu*. Payot, Paris, 1973.
- [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.
- [Fed03] R. Fedkiw. Simulating natural phenomena for computer graphics. In S. Osher and N. Paragios, editors, *Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics*, pages 461–479. Springer Verlag, New York, 2003.
- [Fer97] J. Ferber. Les systèmes multi-agents : un aperçu général. *Technique et Science Informatique*, 16(8) :979–1012, 1997.
- [FM96] J. Ferber and J.P. Müller. Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, pages 72–79, Kyoto, 1996.
- [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 Wissenschaften, Prague, 1804.
- [Gib79] J.J. Gibson. *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London, 1979.
- [Gom00] M. Gomez. Interactive simulation of water surfaces. In *Games Programming Gems*, pages 185–193. Charles River Media, 2000.
- [GPWS96] O.M. Griffin, R.D. Peltzer, H.T. Wang, and W.W. Schultz. Kinematic and dynamic evolution of deep water breaking waves. *Journal of Geophysical Research*, 101(C7) :16515–16531, 1996.
- [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.
- [HNC02] D. Hinsinger, F. Neyret, and M.-P. Cani. Interactive animation of ocean waves. In *Symposium on Computer Animation (SCA)*, pages 161–166, 2002.
- [HRT99] F. Harrouet, P. Reignier, and J. Tisseau. Multiagent systems and virtual reality for interactive prototyping. In *(ISAS)*, volume 3, pages 50–57, Orlando (USA), 1999.
- [HTRC02] F. Harrouet, J. Tisseau, P. Reignier, and P. Chevailler. oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents. *Technique et Science Informatiques (RSTI-TSI)*, 21(4) :499–524, 2002.
- [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.
- [Jan03] P.A.E.M. Janssen. Nonlinear four wave interactions and freak waves. In *Geophysical Research Abstract*, editor, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, volume 5, page 02768, Nice, France, 2003.
- [JG01] L.S. Jensen and R. Goliás. Deep-water animation and rendering. In *Game Developer 's Conference (Gamasutra)*, 2001.
- [KD76] A. Klinger and C.R. Dyer. Experiments on picture representation using regular decomposition. *Computer Graphics and Image Processing*, 5 :68–105, 1976.

- [KH94] G.J. Komen and K. Hasselmann. *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapter The action balance equation and the statistical description of wave evolution, pages 5–48. Cambridge University Press, 1994.
- [KM90] M. Kass and G. Miller. Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics. *Computer Graphics*, 24(4) :49–57, 1990.
- [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 Niocaill, editors, *Oceanic Whitecaps*, pages 15–35. Reidel, D. Publishing Company, 1986.
- [LH94] M.S. Longuet-Higgins. A fractal approach to breaking waves. *Journal of Physical Oceanography*, 24 :1834–1838, 1994.
- [LKR⁺96] P. Lindstrom, D. Koller, W. Ribarsky, L. Hodges, N. Faust, and G. Turner. Real-time continuous level of detail rendering of height fields. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 30 :109–118, 1996.
- [Lov03] J. Loviscach. Complex water effects at interactive frame rates. *Computer Graphics (WSCG)*, 11(1), 2003.
- [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.
- [Luc00] A. Luciani. From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes - a mesoscopic physically-based particle model. In *GraphiCon*, volume 10, pages 282–289, Moscou, Russie, 2000.
- [May92] R. Mayençon. *Météorologie marine*. EMOM, Edilarge, 1992.
- [MCR82] E. Mollo-Christensen and A. Ramamonjariisoa. Subharmonic transitions and group formation in a wind wave field. *Journal of Geophysical Research*, 87(C8) :5699–5717, 1982.
- [Mes02] D.R. Mestre. Interactions entre réalité virtuelle et neurosciences comportementales. In *Virtual Concept*, Biarritz, France, 2002. ESTIA.
- [Mie74] J.C. Miellou. Itérations chaotiques à retard, étude de la convergence dans le cas d'espace partiellement ordonnés. In *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, volume 278 of A, pages 957–960. 1974.
- [Mil57] J.W. Miles. On the generation of surface waves by shear flows. *Fluid Mechanics*, 3 :185–204, 1957.
- [MM02] W.K. Melville and P. Matusov. Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417 :58–63, 2002.
- [Mor03] G. Moreau. Interaction in virtual environments. In *Virtual Concept*, pages 264–270, Biarritz, France, 2003. ESTIA.
- [MWM87] G.A. Mastin, P.A. Watterger, and J.F. Mareda. Fourier synthesis of ocean scenes. *Computer Graphics*, 14 :16–23, 1987.
- [MYV93] J. Maillot, H. Yahia, and A. Verroust. Interactive texture mapping. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 27 :27–34, 1993.
- [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.
- [PDH92] W.J. Pierson, M.A. Donelan, and W.H. Hui. Linear and nonlinear propagation of water wave groups. *Journal of Geophysical Research*, 97(C4) :5607–5621, 1992.
- [Pea86] D.R. Peachey. Modeling waves and surf. *Computer Graphics*, 20(4) :65–74, 1986.
- [PGT03] M. Parenthoën, J. Gourrion, and J. Tisseau. Les états de mer : un état de l'art ; le marin, l'océanographe et l'infographiste. In *Actes des 16^{ème} journées de l'AFIG*, pages 129–140. Université de Paris VIII, 2003.
- [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.
- [PJT04] M. Parenthoën, T. Jourdan, and J. Tisseau. IPAS : Interactive Phenomenological Animation of the Sea. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, à paraître, 2004.
- [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.
- [RC04] N. Reul and B. Chapron. A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse, 2004.
- [RM90] R.J. Rapp and W.K. Melville. Laboratory measurements of deep water breaking waves. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A331 :735–780, 1990.
- [Ros91] R. Rosen. *Life itself : a comprehensive enquiry into the nature, origin and fabrication of life*. Columbia University Press, New York, 1991.
- [Saw62] M.D. Sawney. A study of ocean wave amplitudes in terms of the theory of runs of a Markov train process. Technical report, New York University, 1962.
- [SC66] R.L. Snyder and C.S. Cox. A field study of the wind generation of ocean waves. *Mar. Res.*, 24(2) :141–178, 1966.
- [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.
- [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.
- [Ste02] J. Stewart. La modélisation en biologie. In *Enquête sur le concept de modèle, Partie 1 - Logique et sciences de la nature*, pages 43–66. PUF, 2002.
- [TDG00] S. Thon, J.M. Dischler, and D. Ghazanfarpour. 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 3–1–3–18,45–62, 2001.
- [TH03] J. Tisseau and F. Harrouet. *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 2, chapter Autonomie des entités virtuelles. Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2003.
- [TSCT03] F. Tyniuk, C. Schlick, B. Claverie, and G. Thomas. Modèles et facteurs humains en IHM - application à la réalité virtuelle. In A. Herzig, B. Chaidraa, and P. Mathieu, editors, *Modèles Formels de l'Interaction (MFI)*, pages 301–306, Lille, France, 2003. Cepaduès.
- [Var79] F.J. Varela. *Principles of biological autonomy*. Elsevier, New York, 1979.
- [Wal92] M. Waldrop. *Complexity : The emerging science at the edge of order and chaos*. Touchstone, New York, 1992.
- [Wamdi88] 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.
- [Wil75] J. Willebrand. Energy transport in a nonlinear and inhomogeneous random gravity wave field. *J. Fluid Mech.*, 22 :113–126, 1975.